

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ,  
МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«Харківський політехнічний інститут»

Ministry of Education & Science, Youth & Sport of Ukraine  
National Technical University  
«Kharkiv Polytechnic Institute»

**СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ  
В МАШИНОБУДУВАННІ**

**MODERN TECHNOLOGIES  
OF ENGINEERING**

**Збірник наукових праць**

**Printed scientific works**

Видається з 2008 року

**Випуск 6**

**Edition № 6**

ХАРКІВ НТУ «ХПІ» – 2011 – KHARKIV NTU «KHPI»

**ББК 34.63**

**С 56**

**УДК 621.91**

Державне видання  
Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 13438-2322Р від 03.08.2007 р.

Друкується за рішенням Вченої Ради НТУ "ХПІ",  
протокол № 7 від 05.07.2011 р.

*Редакційна  
колегія:*

В. О. Федорович (відповідальний редактор),  
В. Л. Доброскок (зам. відповідального редактора),  
О. В. Балака (відповідальний секретар),  
М. В. Верезуб, Ю. М. Внуков, А. І. Грабченко,  
Б. Карпушевський, Я. Кундрак, П. П. Мельничук,  
О. Я. Мовшович, М. В. Новіков, Ю. А. Сізий,  
Ю. В. Тимофієв, Р. С. Турманідзе, В. А. Фадєєв,  
М. Д. Узунян

*Адреса редак-  
ційної колегії:*

61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21,  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»  
кафедра «Інтегровані технології машинобудуван-  
ня» ім. М. Ф. Семка,  
тел.: 8 (057) 706-41-43.

**Сучасні** технології в машинобудуванні [Текст]: зб. наук. праць. –  
**С56** Вип. 6. / редкол.: В. О. Федорович (голова) [та ін.]. – Харків :  
НТУ «ХПІ», 2011. – 348 с. – Укр., рос., англ. мовами.

Збірник містить наукові статті відомих вчених України і закордонних країн з актуальних проблем інтегрованих технологій, процесів різання і технологічного забезпечення якості. Викладено сучасні аспекти лазерної технології, зміцнення зносостійких покриттів, обробки конструкційної кераміки. Описано особливості функціонально-орієнтованих технологій і їхній зв'язок з інтегрованими технологіями. Розглянуто моделювання процесів різання і тенденції їхнього удосконалювання.

Для науковців, викладачів вищих навчальних закладів, промисловців.

**ББК 34.63**

© Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут», 2011

## ПРОФЕССОР ЭНГЕЛЬБЕРТ ВЕСТКЕМПЕР

*Знания зависят от ученья,  
Почет – от дел,  
Благополучие – от усердия,  
Награда – от судьбы.*

*Из афоризмов древнего мира*

*Личность характеризуется не  
только тем, что она делает, но и  
тем, как она это делает.*

*Ф. Энгельс*

Энгельберт Весткемпер родился 7 марта 1946 г. в Замке Нойгаус-Падерборн, Германия. Окончил народную школу в 1957 г., затем гимназию Теодорианум в Падерборне. Служил в армии (1966-1967 гг.). Получил образование дипломированного инженера в Технической высшей школе г. Аахен, там же получил степень доктора-инженера с отличием, защитив диссертацию на тему «Гибкая автоматизация в малом и среднем производстве». Затем годы работы инженером-исследователем (1973-1977 гг.) и переход в Мюнхен в авиационно-космическую промышленность – Мессер-Шмидт–Белков в Бремен, переход в электро-электронную промышленность, руководство центральным департаментом «Технология производства» во Франкфурте.

В 1988 г. Э. Весткемпер становится профессором и директором института станков и техники изготовления в техническом университете Брауншвайга, членом Сената комитета объединенного научного центра немецкого общества исследователей, а в 1995 г. – профессором и директором института промышленного производства и управления в Штуттгартском университете, директором Фраунгофер – Института производственной техники и автоматизации, деканом машиностроительного факультета, неоднократно возглавлял выставочные комитеты, экспертные советы, член объединенного научного центра 374 «Rapid Prototyping». Приняв эстафету от профессора Варнеке, Э. Весткемпер в Штуттгартском университете ведет курсы лекций по технологии металлов, по технике и организации промышленных предприятий и производств, стратегии производства, научному и информационному менеджменту.

С 2004 года активно участвует в разработке Единой Европейской технологической платформы «ManuFuture», становится одним из главных руководителей – координатором программы, уделяя особое внимание участию в этой программе новых членов Европейского союза – Польши, Чехии, Венгрии и др. стран. Большие усилия приложил для вовлечения в эту работу Украины.

Высокопродуктивной была его работа в качестве председателя и главного администратора Школы дипломированных специалистов по новейшим технологиям (Университет Штутгарт), а также на посту Вице-председателя «Эврика-групп» «Производства будущего» и члена Европейской ассоциации исследователей производства будущего EFFRA и др.

Активно участвовал профессор Весткемпер в работе объединенного научного центра ориентированного контроля качества (Ганновер-Брауншвейг), научного центра 374 «Rapid Prototyping» (Штутгарт), трансферцентра «Гибкая сборка» (Штутгарт), Центра трансформируемых бизнес структур (Штутгарт), Объединенного научного центра 627 «Nexus».

Высокую степень признания Э. Весткемпера как одаренного высокопродуктивного ученого подтверждает его членство во многих научных организациях – Научное общество производственной техники, CIRP, Общество исследователей природы и медицина, Немецкая Академия технологии, руководящая группа программы «ManuFuture», а также в таких объединениях, как «Производство и логистика», Германское общество качества, Исследовательское общество обеспечения качества и др.

Поражает широта области научных интересов профессора Весткемпера – менеджмент производства, реальное и виртуальное производство, производственные системы и управление, производственные технологии, инженерия поверхности, управление качеством, управление жизненным циклом изделий – миниатюризация изделий машиностроения, покрытия, деревообработка и др.

Большое внимание профессор Весткемпер уделяет работе с аспирантами: в университетах Брауншвайга и Штуттгарта им подготовлено более 130 кандидатов технических наук.

Впечатляющие результаты издательской деятельности юбиляра. Опубликовано более 900 научных статей и книг, например, «The ManuFuture Road», «Будущее чистовой обработки». Он является научным редакто-

ром и редактором-консультантом немецких профессиональных изданий в Берлине, Мюнхене, Брауншвайге, Дюссельдорфе, международного журнала японского общества инженеров-механиков (JSME), Лондонского журнала общества инженеров-механиков. Всепронизывающим мотивом многих изданий является компьютерно интегрированные производственные системы, промышленный менеджмент современных предприятий.

Неоднократно читал лекции в НТУ «ХПИ», выступал с докладами на конференции «Интерпартнер» в Крыму.

Профессор Весткемпер Э. избран Почетным членом Объединения немецких инженеров, является признанным авторитетом и в сферах высшего образования. Опубликовал ряд учебников и учебных пособий, многие из которых переведены на другие языки, например, «Введение в организацию производства» издано в НТУ «ХПИ» на русском языке. Неоднократно приглашался для чтения лекций в ведущие Университета Европы, Азии.

О высокой степени признания свидетельствует избрание проф. Весткемпера Почетным профессором кафедры «Интегрированные технологии машиностроения» НТУ «ХПИ», Почетным доктором НТУ «ХПИ», Технического университета Клуж-Напока (Румыния), Университета Баотоу (Китай), Университета Отто-фон-Герике (Магдебург, Германия).

Награжден Федеральным Крестом «За заслуги» первой степени Федеративной Республики Германия.

Все, кто знаком с профессором Э. Весткемпером, отмечают его глубокую эрудицию, интеллигентность, поражающую скромность, доброжелательное отношение к людям, толерантность и дружелюбие.

Редколлегия сборника сердечно поздравляет профессора Энгельберта Весткемпера с юбилеем и желает ему доброго здоровья и новых свершений.

# ФІЗИКА ТА МЕХАНІКА ПРОЦЕСІВ ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ

УДК 534.1

**Ю. Н. ВНУКОВ**, д-р техн. наук, проф., **В. А. ЛОГОМИНОВ**,  
**С. А. БЕЗДОЛЬНЫЙ**, Запорожжє, Україна

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕЖЕСТКИХ ДЕТАЛЕЙ ТИПА ЗАЩЕМЛЕННЫХ ПЛАСТИН

У статті викладена методика визначення динамічних характеристик нежорстких деталей типу затиснених пластин. Динамічні характеристики визначались за віброграмою згасаючих коливань, отриманої з використанням безконтактного струмовихрового датчика. Отримані значення частот власних коливань і логарифмічного декременту згасаючих коливань при різних вильотах платини і різних значеннях додаткових мас. Проведено порівняння вимірянних значень частот власних коливань з їх розрахунковими значеннями.

В статье изложена методика определения динамических характеристик нежестких деталей типа защемленных пластин. Динамические характеристики определялись по виброграмме затухающих колебаний, полученной с использованием бесконтактного токовихрового датчика. Полученные значения частот собственных колебаний и логарифмического декременту затухающих колебаний при разных вылетах платины и разных значениях дополнительных масс. Проведены сравнения измеренных значений частот собственных колебаний с их расчетными значениями.

*Ju. N. VNUKOV, V. A. LOGOMINOV, S. A. BEZDOL'NYJ*  
*DEFINITION OF DYNAMIC CHARACTERISTICS OF NONRIGID DETAILS OF THE*  
*JAMMED PLATES TYPE*

The article contains technique of determining the dynamic characteristics of non-rigid parts such as clamped plates. Dynamic characteristics were determined by vibrorecord of damped oscillations obtained using contactless eddy-current sensor. The values of natural frequencies and logarithmic decrement have been measured at different overhang of plate and different values of the additional masses. Comparison the measured values of natural frequencies with their calculated values has been carried.

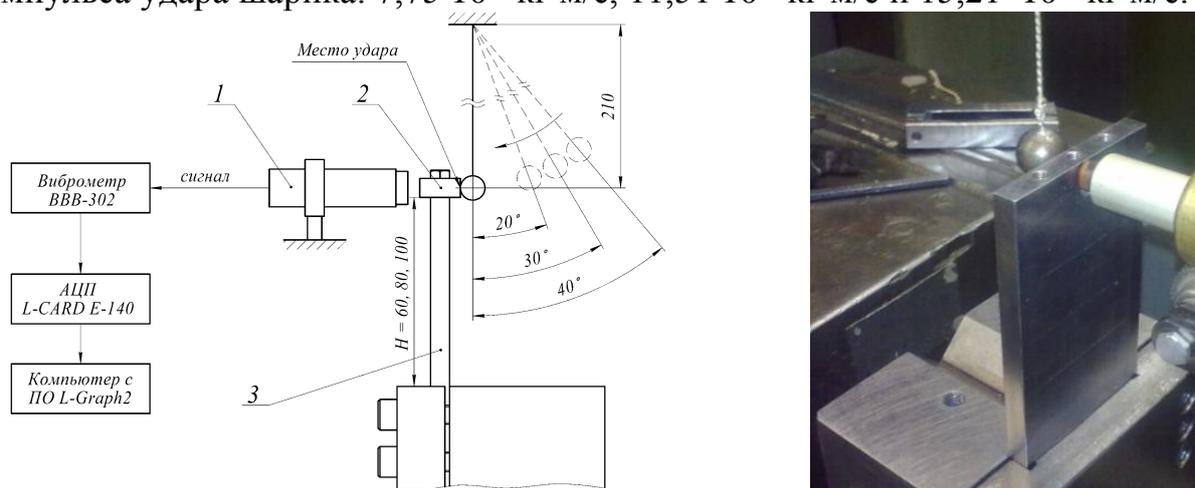
Одной из тенденций развития современного машиностроения является снижение материалоемкости. В этой связи все более широкое применение находят детали с тонкостенными нежесткими элементами. Обработка резанием нежестких деталей связана с некоторыми трудностями, одними из которых является появление вибраций. Методики прогнозирования виброустойчивых режимов обработки исходят из того факта, что система СПИД при резании представляет собой замкнутую динамическую систему, состоящую, собственно, из упругой системы и процесса резания [1]. Виброустойчивость процесса резания определяется динамическими характери-

стиками системы СПИД и процесса резания. В случае обработки нежестких деталей доминирующей колебательной системой, в составе системы СПИД, является система заготовки. Таким образом, для прогнозирования виброустойчивости обработки нежестких деталей необходимо уметь определять их динамические характеристики.

Под динамическими характеристиками нежестких деталей типа заземленных пластин будем подразумевать частоты собственных колебаний и логарифмический коэффициент демпфирования. Частоты собственных колебаний определялись аналитически, методом конечных элементов и экспериментально.

Аналитический расчет частот собственных колебаний заземленных пластин проводился по методике, изложенной в работе [2]. Расчет частот собственных колебаний методом конечных элементов проводился с помощью программного пакета ANSYS [3]. Для моделирования пластин использовались как 8-ми узловой оболочечный элемент, так и 20-ти узловой трехмерный конечный элемент. Для нахождения частот и форм собственных колебаний использовался метод Ланцоша [4]. Влияние демпфирования на снижение частоты собственных колебаний не учитывалось.

Экспериментальное определение динамических характеристик проводили на установке, моделирующей нежесткую деталь типа заземленной пластины (рис. 1). Упругий элемент (пластина) изготовлена из Стали 60Г, имеет толщину 8 мм, ширину 60 мм и регулируемую высоту (вылет). Исследования проводились при трех значениях вылетов: 60, 80 и 100 мм, для четырех схем крепления дополнительных масс (рис. 2) и трех значениях импульса удара шарика:  $7,75 \cdot 10^{-3}$  кг·м/с,  $11,51 \cdot 10^{-3}$  кг·м/с и  $15,21 \cdot 10^{-3}$  кг·м/с.



1 – бесконтактный токовихревой датчик;  
2 – образец; 3 – упругий элемент (пластина)

Рисунок 1 – Схема определения динамических характеристик с помощью бесконтактного датчика

Динамические характеристики определялись по виброграмме затухающих колебаний, которые вызывались методом ударного возбуждения [5]. Виброперемещение упругого элемента регистрировалось бесконтактным токовихревым датчиком, входящим в комплект виброметра ВВВ-302. Далее аналоговый сигнал с виброметра преобразовывался аналого-цифровым преобразователем E-140 фирмы LCARD и записывался с помощью программы L-Graf. Частоту собственных колебаний определяли спектральным анализом виброграммы затухающих колебаний методом быстрого преобразования Фурье (БПФ) [6]. Типичный спектр показан на рис. 3. Как видно из рис. 3 основной вклад в колебаниях упругого элемента вносят колебания по первой изгибной форме.

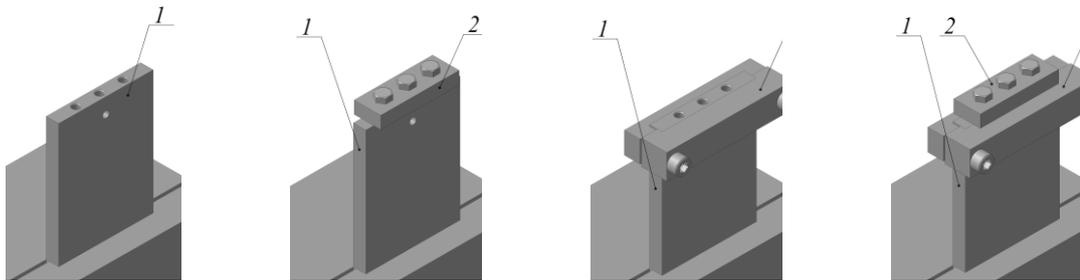


Схема 1

Схема 2

Схема 3

Схема 4

1 – упругий элемент; 2 – образец ( $m = 44,5$  г);  
3 – дополнительная масса ( $m = 185,5$  г).

Рисунок 2 – Схемы крепления дополнительных масс

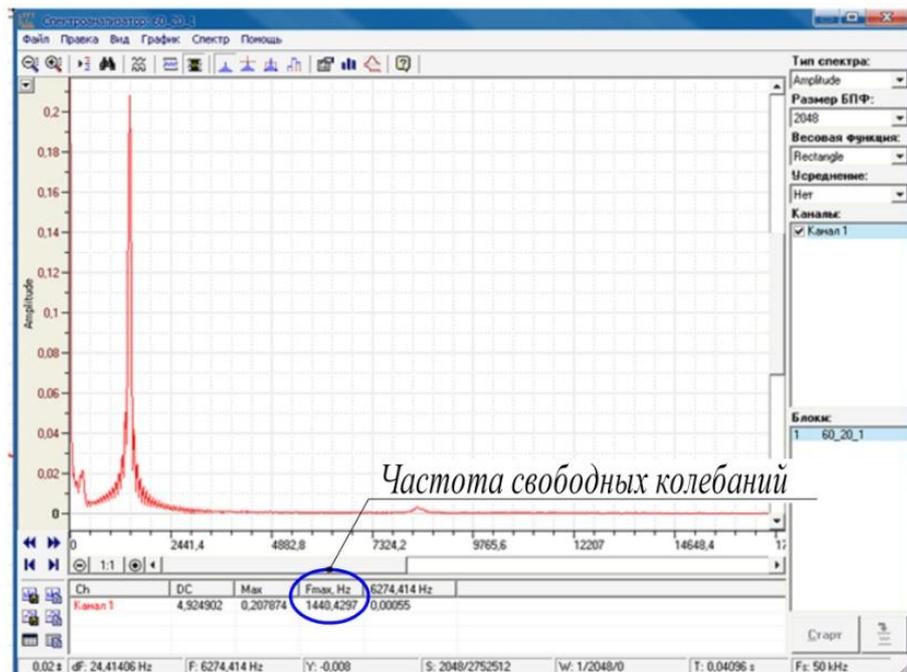


Рисунок 3 – Спектр затухающих колебаний упругого элемента, полученный методом БПФ

Исследовалось влияние вылета упругого элемента на частоту собственных колебаний при различных схемах крепления дополнительных масс. На рис. 4 показаны частоты собственных колебаний упругого элемента для 1 схемы при различных его вылетах, полученные расчетными методами и экспериментально измеренные. Погрешность рассчитанных частот собственных колебаний снижается с увеличением вылета упругого элемента: 33% для  $H=60$  мм, 23% для  $H=80$  мм и 13% для  $H=100$  мм. Эта погрешность связана с неидеальностью закрепления. Для остальных схем закрепления погрешность рассчитанных частот собственных колебаний также снижается с увеличением вылета упругого элемента.

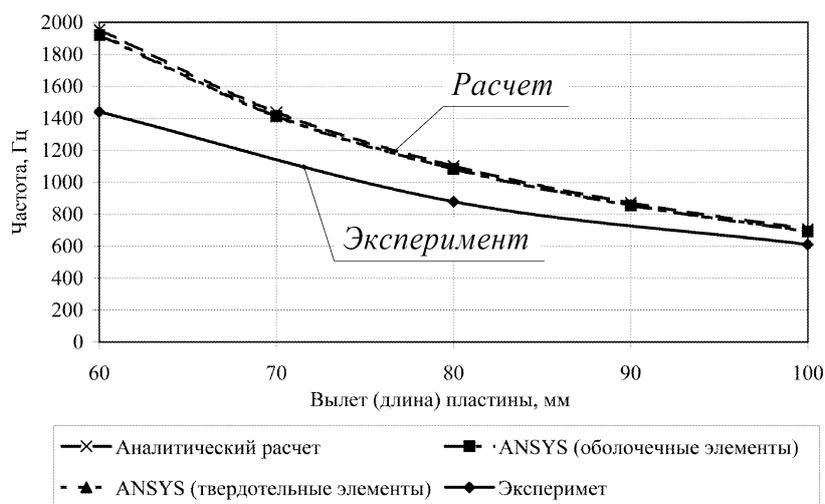


Рисунок 4 – Частоты собственных колебаний упругого элемента по первой форме для первой схемы

На рис. 5 показано влияние закрепления дополнительных масс на частоту собственных колебаний упругого элемента. Как видно с увеличением дополнительной массы частота свободных колебаний снижается тем больше, чем больше добавляемая масса.

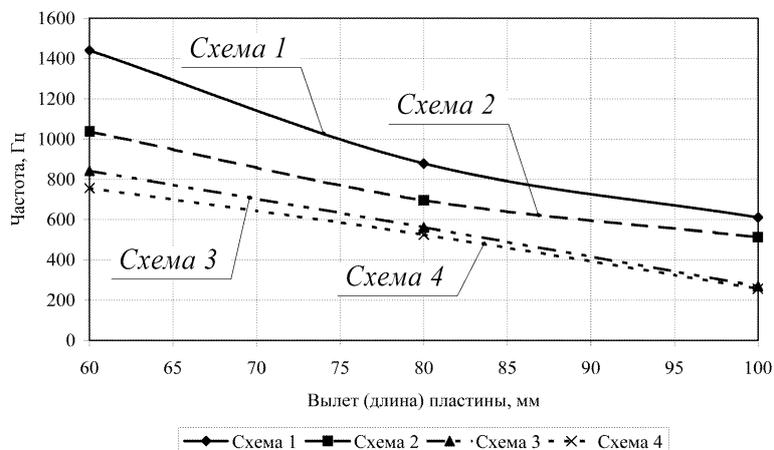


Рисунок 5 – Экспериментально измеренные частоты собственных колебаний упругого элемента по первой форме

Зависимость максимальной амплитуды колебаний (амплитуда первого колебания) от импульса удара шарика показана на рис. 6. С увеличением импульса удара и снижением дополнительной массы возрастает максимальная амплитуда колебаний при всех вылетах упругого элемента. Частота собственных колебаний упругого элемента при этом не изменяется.

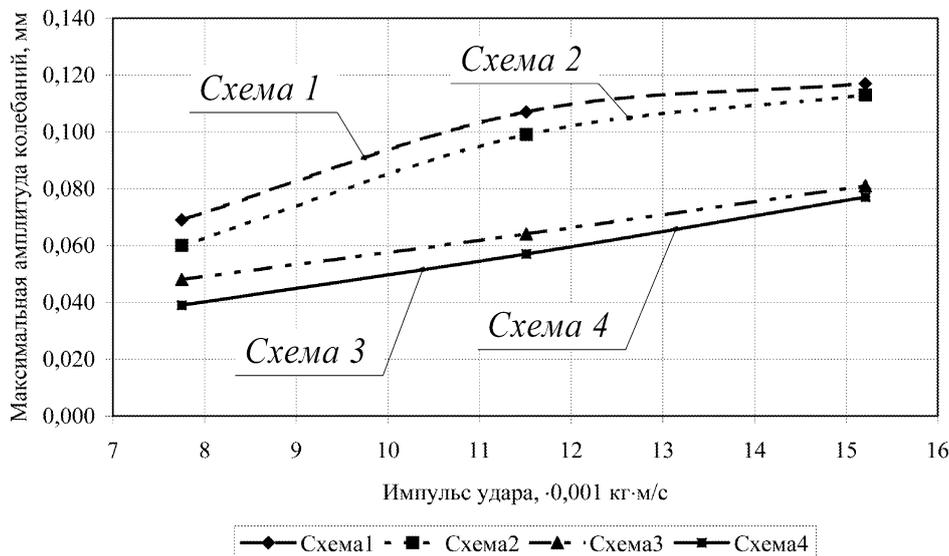


Рисунок 6 – Зависимость максимальной амплитуды колебаний от импульса удара шарика для вылета упругого элемента  $H=100$  мм

Логарифмический декремент затухающих колебаний определялся следующим образом. Из сигнала затухающих колебаний (рис. 7а) используя преобразование Гильберта находится аналитический сигнал:

$$\dot{s}_a t = s t + j s_{\perp} t , \quad (1)$$

где  $\dot{s}_a t$  – аналитический сигнал;  $s_{\perp} t$  – сопряженный сигнал, полученный из исходного сигнала  $s t$  преобразованием Гильберта;  $j$  – мнимая единица. Далее из аналитического сигнала находим его амплитудную огибающую (рис. 7б) [6]:

$$A t = |\dot{s}_a t| = \sqrt{s^2 t + s_{\perp}^2 t} . \quad (2)$$

Обработка виброграммы производится в среде программы MATLAB. Далее амплитудная огибающая аппроксимируется в пакете Curve Fitting Toolbox программы Matlab экспоненциальной функцией (рис. 7в) [7]:

$$A t = A_{\max} e^{-bt} . \quad (3)$$

По найденному коэффициенту  $b$  определяем логарифмический декремент:

$$\delta = \frac{b}{f}, \quad (4)$$

где  $f$  – частота свободных колебаний упругого элемента.

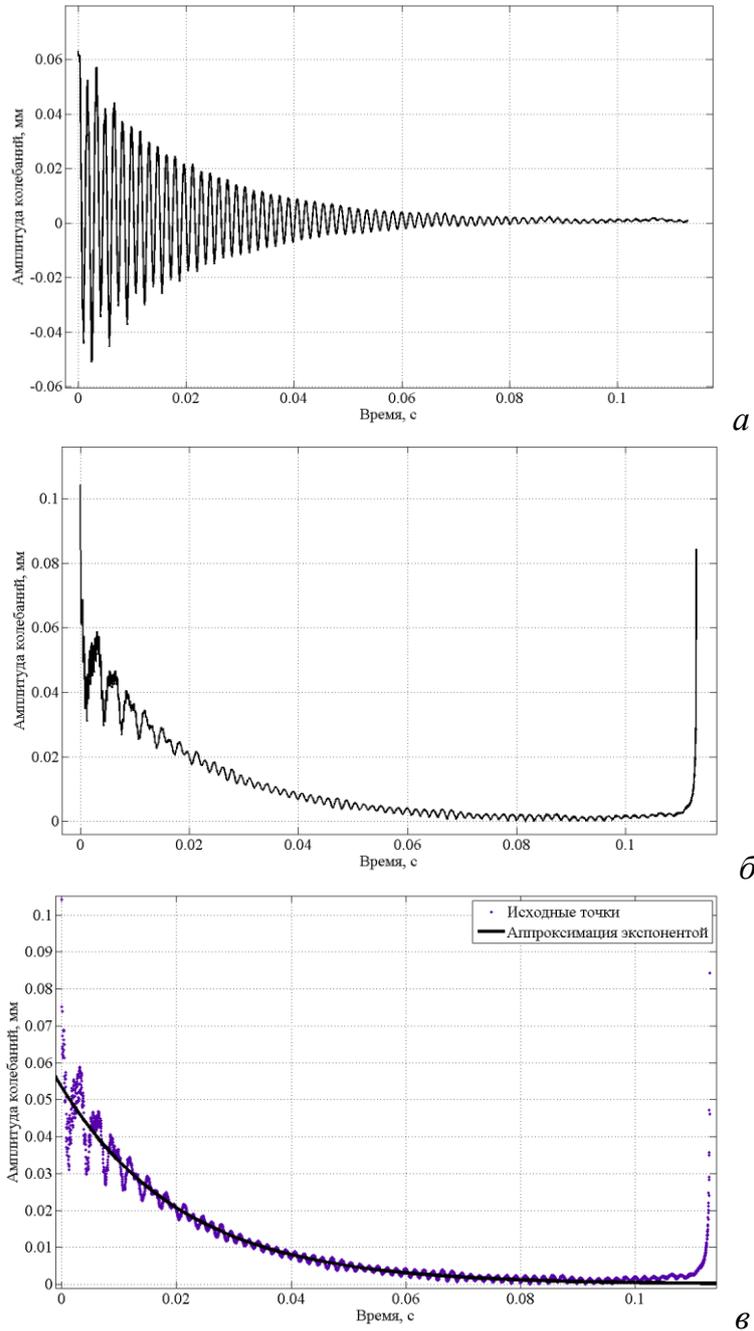


Рисунок 7 – Обработка виброграммы затухающих колебаний

Проведенные измерения логарифмического декремента показали (рис. 8), что он возрастает при увеличении вылета упругого элемента и увеличении дополнительных масс. От величины импульса удара шарика логарифмический декремент практически не изменяется (рис. 9).

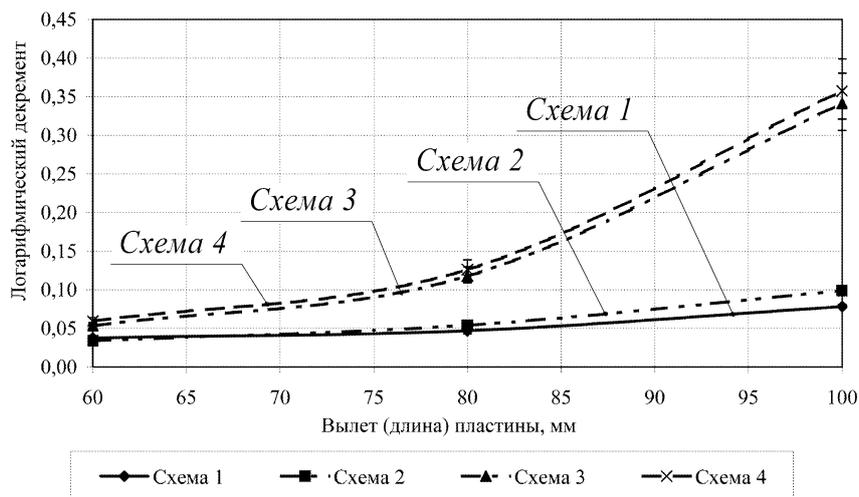


Рисунок 8 – Логарифмический декремент затухающих колебаний при различных вылетах упругого элемента

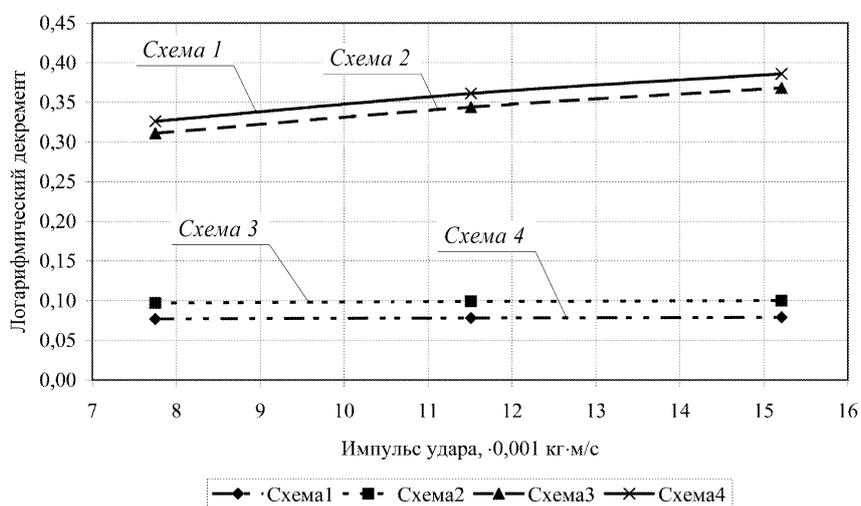


Рисунок 9 – Логарифмический декремент затухающих колебаний при различных импульсах удара шарика

Полученные значения логарифмического декремента находятся в одном диапазоне со значениями, приведенными в работе [2] (средний логарифмический декремент для фрезерных станков – 0,23) и в работе [8] (логарифмический декремент для фрезерной оправки из Стали 45 – 0,32, из Стали 30ХГСА – 0,33).

Проведенные исследования динамических характеристик установки моделирующей нежесткую деталь типа заземленной пластины позволяют сделать следующие выводы:

1. При ударном возбуждении стальным шариком возникают преимущественно колебания по первой изгибной форме.
2. Частота собственных колебаний определяется свойствами самой упругой системы и не зависит от импульса удара шарика. Частота собст-

венных колебаний уменьшается с увеличением вылета упругого элемента (пластины), и увеличением массы колебания системы.

3. Максимальное значение амплитуды, после ударного возбуждения УС импульсом силы увеличивается с увеличением вылета упругого элемента (пластины), и снижением массы УС. Увеличение значения импульса силы увеличивало амплитуду колебаний.

4. Логарифмический декремент затухания, определяющий демпфирующие характеристики УС, возрастает с увеличением вылета упругого элемента (пластины) и массы колебательной системы. Изменение импульса удара не оказывает влияния на величину логарифмического декремента затухания.

В дальнейшем планируется использовать установку, моделирующую нежесткую деталь типа заземленной пластины, для исследований вибрационных процессов при фрезеровании с целью изучения влияния динамических характеристик упругой системы и режимов фрезерования на вибрации, возникающие при обработке.

**Список использованных источников:** 1. Кудинов В.А. Динамика станков / В.А. Кудинов. – М.: Машиностроение, 1967. – 360 с. 2. Прочность, устойчивость, колебания – Справочник в трех томах. Том 3 / Под ред. И.А. Биргера и Я.Г. Пановко. – М.: Машиностроение, 1968. – 587 с. 3. Madenci E. The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS / Erdogan Madenci, Ibrahim Guven. – USA, Springer. – 686 p. 4. Гайджузов П.П. Расчет стержневых систем на устойчивость и колебания: учебное пособие / П.П. Гайджузов. – Юж.-Рос. гос. техн. ун-т. – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2009. – 195 с. 5. ГОСТ ISO 7626-5-99 Вибрация и удар. Экспериментальное определение механической подвижности. Часть 5. Измерения, использующие ударное возбуждение возбудителем, не прикрепляемым к конструкции. – Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2000. – 20 с. 6. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов / Сергиенко А.Б. – СПб.: Питер, 2002. – 608 с. 7. Ануфриев И. MATLAB 7. Наиболее полное руководство / И. Ануфриев, А. Смирнов, Е. Смирнова. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 1082 с. 8. Жарков И.Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом / И.Г. Жарков. – Л.: Машиностроение. Ленингр. Отделение, 1986. – 184 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Kudinov V.A. Dinamika stankov / V.A. Kudinov. – M.: Mashino-stroenie, 1967. – 360 s. 2. Prochnost', ustojchivost', kolebanija – Spravochnik v treh tomah. Tom 3 / Pod red. I.A. Birgera i Ja.G. Panovko. – M.: Mashinostroenie, 1968. – 587 s. 3. Madenci E. The Finite Element Method and Applications in Engineering Using AN-SYS / Erdogan Madenci, Ibrahim Guven. – USA, Springer. – 686 p. 4. Gajdzhurov P.P. Raschet stержnevyyh sistem na ustojchivost' i kolebanija: uchebnoe posobie / P.P. Gaj-dzhurov. – Juzh.-Ros. gos. tehn. un-t. – Novocherkassk: JuRGTU, 2009. – 195 s. 5. GOST ISO 7626-5-99 Vibracija i udar. Jeksperimental'noe opredelenie mehanicheskoj pod-vizhnosti. Chast'5. Izmerenija, ispol'zujuvie udarnoe vozbuzhdenie vozbuditelem, ne prikrepnjaemym k konstrukcii. – Minsk: Mezghosudarstvennyj sovet po standartizacii, metrologii i sertifikacii, 2000. – 20 s. 6. Sergienko A.B. Cifrovaja obrabotka signalov / Sergienko A.B. – SPb.: Piter, 2002. – 608 s. 7. Anufriev I. MATLAB 7. Naibolee polnoe rukovodstvo / I. Anufriev, A. Smirnov, E. Smirnova. – SPb.: BHV-Peterburg, 2005. – 1082 s. 8. Zharkov I.G. Vibracii pri obrabotke lezviynym instru-mentom / I.G. Zharkov. – L.: Mashinostroenie. Leningr. Otd-nie, 1986. – 184 s.

**В. В. ГУСЕВ**, д-р техн. наук, **Л. П. КАЛАФАТОВА**, д-р техн. наук,  
**С. Ю. ОЛЕЙНИК**, Донецк, Украина

## **ОБОСНОВАНИЕ РАСЧЕТНОЙ СХЕМЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ АЛМАЗНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ ТОНКОСТЕННЫХ ОБОЛОЧЕК ИЗ СИТАЛЛОВ**

В статье представлена расчетная схема для исследования динамического состояния технологической системы алмазно-абразивной обработки тонкостенных оболочек вращения сложной формы из ситалла. Определены показатели, которые необходимо учитывать при создании математической модели динамических процессов, происходящих в системе во время обработки.

В статті представлена розрахункова схема для дослідження динамічного стану технологічної системи алмазно-абразивної обробки тонкостінних оболонок обертання складної форми з ситалу. Визначені чинники, які необхідно враховувати при створенні математичної моделі динамічних процесів, що відбуваються в системі під час обробки.

*V. V. GUSEV, L. P. KALAFATOVA, S. Ju. OLEJNIK*

### *SUBSTANTIATION OF THE SETTLEMENT SCHEME FOR RESEARCH OF THE DYNAMIC CONDITION OF TECHNOLOGICAL SYSTEM OF DIAMOND-ABRASIVE PROCESSING THIN-WALLED ENVIRONMENTS FROM GLASSCERAMICS*

The article presents a design scheme for the study of the dynamic state of the technological system of diamond-abrasive processing of glass-ceramic's thin-walled shells of complex shape. Indicators that must be considered for creating mathematical models of dynamic processes occurring in the system during processing were determined .

#### *Введение*

С развитием науки и техники перед современным машиностроением ставится ряд многообразных задач, одна из которых - надежное обеспечение технических характеристик изделий типа конструкций, работающих в широком диапазоне температур, при сложном сочетании переменных силовых и тепловых воздействий, в агрессивных рабочих средах. Часто условия эксплуатации изделий таковы, что для их изготовления невозможно или нерационально использовать металлы. В таких случаях задача решается за счет разработки и внедрения неметаллических материалов, к которым относятся различные виды технической керамики, в том числе и ситаллы. Ситаллы обладают комплексом требуемых прочностных и эксплуатационных характеристик, среди которых следует отметить высокую твердость, высокую сопротивляемость сжатию при низкой удельной плотности, термостойкость, устойчивость к силовой напряженности и внешнему гидро-

статическому давлению. Эти свойства делают хрупкие неметаллические конструкционные материалы наиболее пригодными для применения в условиях агрессивных сред океана и космоса, в самолето- и ракетостроении. Специфика эксплуатации таких изделий предопределяет повышенные требования к точности изготовления и прочностным характеристикам, которые для материалов рассматриваемого класса в значительной степени определяются шероховатостью обработанной поверхности и сведением к минимуму дефектов поверхностного слоя.

Проведенными исследованиями [1-5] было установлено, что для обеспечения необходимых показателей по точности и качеству для крупногабаритных тонкостенных деталей типа оболочек из ситаллов при разработке технологических процессов (ТП) их механической обработки, в основном реализуемой шлифованием, необходимо учитывать динамику процесса шлифования. Для изучения динамических явлений необходимо иметь точные данные о состоянии элементов системы СПИД и их влиянии на виброустойчивость системы при обработке конкретных изделий.

Было установлено, что шлифование крупногабаритных пустотелых изделий из конструкционной керамики и ситаллов по внутреннему и внешнему контурам сопровождается возникновением сложных колебаний различной природы: вынужденных, параметрических и автоколебаний. В работах [1, 2] представлены результаты, подтверждающие, что вибрации, возникающие в системе при шлифовании оболочек из ситалла, снижают качество поверхности, так как уровень вибраций из-за физико-механических свойств ситаллов оказывает прямое влияние на глубину дефектного слоя, вызванного обработкой. Устранение причин возникновения вибраций предполагает необходимость моделирования процесса шлифования изделий и поведения технологической системы, его реализующей, с учетом динамических характеристик элементов самой системы. Разработка математических зависимостей, которые адекватно моделируют поведение технологической системы, является основой для решения задачи обеспечения параметров качества и точности обрабатываемых шлифованием поверхностей.

*Целью* данной работы является построение принципиальной и эквивалентной схем упругой системы алмазно-абразивной обработки тонкостенных крупногабаритных изделий из ситалла, а также анализ состояния элементов системы с учетом особенностей обрабатываемой заготовки как замкнутой тонкостенной оболочки вращения сложной формы.

#### *Изложение основного материала*

Обрабатываемая деталь – оболочка сложной формы, состоящая из трех частей: конической, параболической и цилиндрической. Таким образом, в конической и параболической своих частях заготовка имеет переменный радиус кривизны. Условно оболочку можно отнести к тонкостенной, если отношение ее толщины к минимальному радиусу кривизны не

превышает 1/20 [6]. Для рассматриваемого диапазона размеров заготовок это условие не всегда выполняется для конической части заготовки.

Заданное качество и точность изделия закладываются на этапах многостадийной алмазно-абразивной обработки, в результате чего формируются профиль детали, ее размерные характеристики, волнистость, шероховатость, определенный уровень дефектности обработанной поверхности. На черновых и получистовых операциях, на которых снимается основной припуск (до 8...9 мм на сторону), алмазно-абразивная обработка ведется способом глубинного шлифования (глубина резания 0,5...1,5 мм), которое сопровождается хрупким разрушением обрабатываемого материала.

Алмазно-абразивная обработка тонкостенных оболочек вращения сложной формы из ситаллов, производится на модернизированных токарных станках РТ60622, оснащенных агрегатной шлифовальной головкой и системой прямого копирования. На рисунке 1 показана схема установки детали на станочном приспособлении – консольной оправке в координатах XZ.

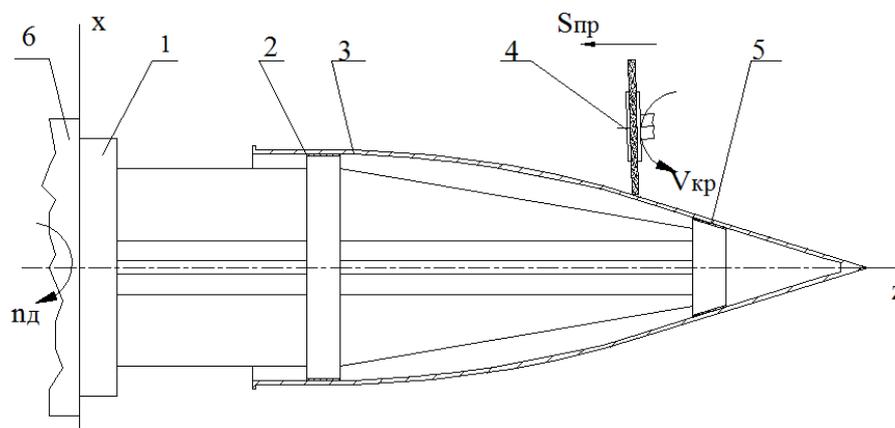


Рисунок 1 – Схема технологической системы при наружном круглом шлифовании детали – тонкостенной оболочки вращения из ситалла: 1 – оправка; 2, 5 – втулки из гетинакса (элементы приспособления – оправки); 3 – обрабатываемая деталь; 4 – шлифовальный круг IAI 200x10x3x76 AI – 315/250-4- M2-01, установленный в агрегатной головке; 6 – шпиндель станка

Проведенный комплекс исследований и теоретико-экспериментальный анализ динамического состояния элементов системы [3-5] показал следующее. Было установлено, что в подсистеме станка «двигатель - коробка скоростей - заготовка» не возникают крутильные колебания, влияющие на точность обработки. Так же выполненный расчет динамических характеристик шпиндельного узла станка свидетельствует о том, что в подсистеме «шпиндельный узел станка - приспособление - заготовка» возникают вынужденные изгибные колебания, которые могут оказывать влияние на качественные характеристики процесса шлифования и, как следствие, на точность обработки изделия. Причиной этого является низкая и переменная по длине заготовки жесткость, что приводит к динамической

неустойчивости процесса резания, наличием вибраций, интенсивность которых меняется в зависимости от схемы обработки, места контакта заготовки с инструментом. В рассматриваемых случаях уровень вибраций определялся по результатам расшифровки профилограмм образцов обработанной поверхности [2], позволившим по величине ее волнистости судить об относительном уровне вибраций. Исследования особенностей вынужденных колебаний подсистемы «приспособление-заготовка» [5] также показали переменную интенсивность уровня вибраций по длине заготовки, сходную с экспериментальной кривой амплитуды колебаний. На рис. 2 по длине заготовки относительно оси  $Z$  приведены динамические и упругие показатели подсистемы «шпиндельный узел–приспособление-заготовка».

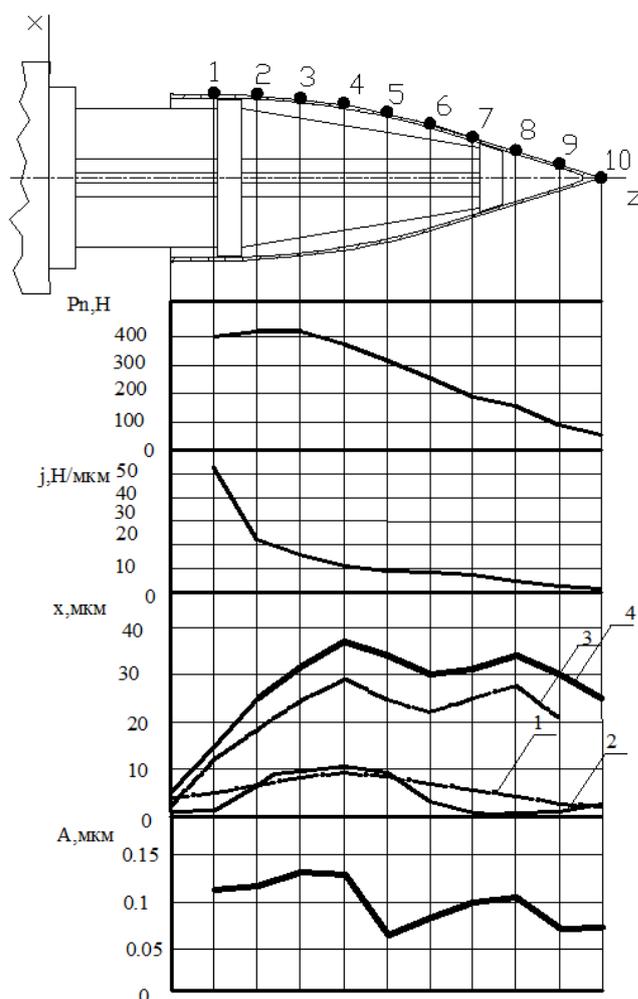


Рисунок 2 – Сравнительные диаграммы изменения динамических и упругих характеристик подсистемы «шпиндельный узел – оправка - заготовка» вдоль оси детали:  $P_n$  – нормальной составляющей силы резания, Н;  $j$  – изгибной жесткости, Н/мкм;  $x$  – статических прогибов, мкм (1 – суммарные радиальные перемещения шпиндельного узла, 2 – радиальные перемещения обрабатываемой заготовки, 3 – радиальные перемещения подсистемы «приспособление-заготовка», 4 – суммарные радиальные перемещения подсистемы «шпиндельный узел - приспособление-заготовка»);  $A$  – амплитуды вибраций, мкм.

Однако полученные теоретические данные имели некоторые расхождения с их экспериментальными значениями. Это можно объяснить следующим. При моделировании не были учтены ряд свойств обрабатываемой заготовки как замкнутой тонкостенной оболочки, а также факторы, связанные с механической обработкой детали на специальном станке, что требует решения задачи моделирования поведения системы при шлифовании на более высоком уровне.

Рассматриваемая технологическая система круглого шлифования крупногабаритной тонкостенной оболочки вращения из ситалла представляет собой сложную механическую систему. В процессе исследований была разработана принципиальная схема упругой системы алмазно-абразивной обработки тонкостенной оболочки из ситалла, которая представлена на рисунке 3.

Далее рассматривается случай, когда шлифовальная головка взаимодействует с обрабатываемой заготовкой на участке ее параболической части, в районе точек 3 и 4, показанных на рисунке 2, где прослеживаются максимальные вибрации технологической системы. На схеме элементы системы обозначены следующим образом: обрабатываемая заготовка  $m_2$ ; оправка, на которой установлена заготовка,  $m_3$ ; инструмент (алмазный круг)  $m_1$ . Такую принципиальную схему с учетом ряда допущений можно привести к эквивалентной расчетной схеме, показанной на рисунке 4.

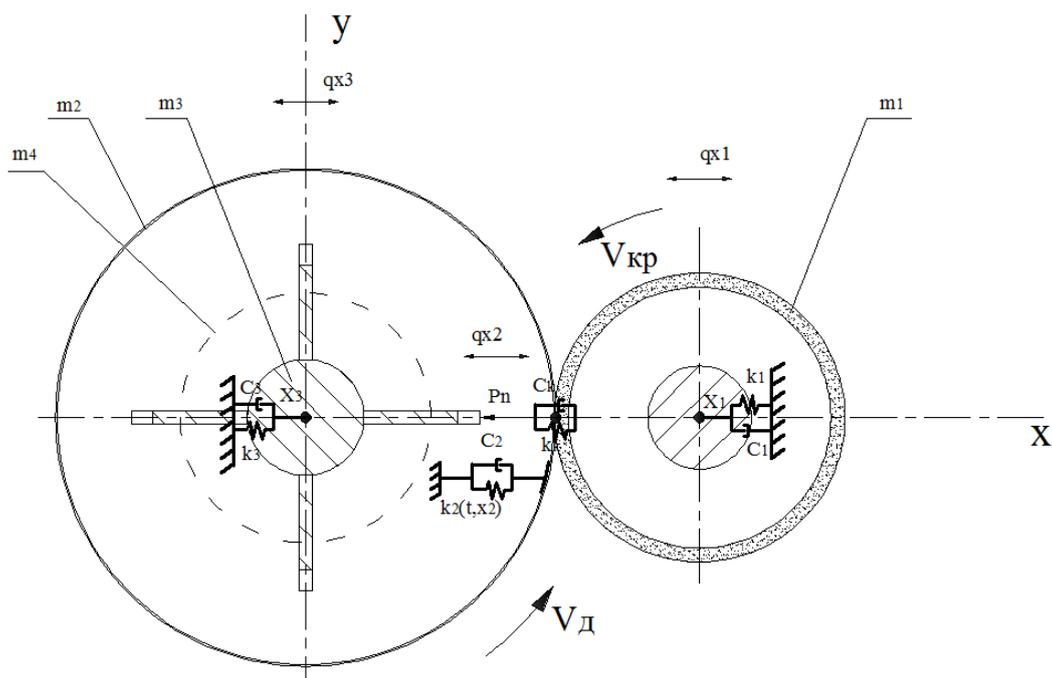


Рисунок 3 – Принципиальная схема упругой системы алмазно-абразивной обработки тонкостенной оболочки вращения из ситалла

Динамические характеристики рассматриваемой системы (см. рис. 3, 4) обозначены следующим образом:  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$ ,  $m_4$  – приведенные массы,

соответственно, агрегатной шлифовальной головки с инструментом, обрабатываемой заготовки (оболочки вращения), оправки, закрепленной в шпинделе станка, на которой установлена заготовка, и шпиндельного узла;  $k_1, k_2, k_3, k_4$  – соответственно, приведенные жесткости агрегатной головки, обрабатываемой заготовки, оправки, шпиндельного узла;  $c_1, c_2, c_3, c_4$  – линейные коэффициенты демпфирования, показывающие величину рассеивания энергии рассматриваемых элементов, соответственно, агрегатной головки, обрабатываемой заготовки, оправки, шпиндельного узла.

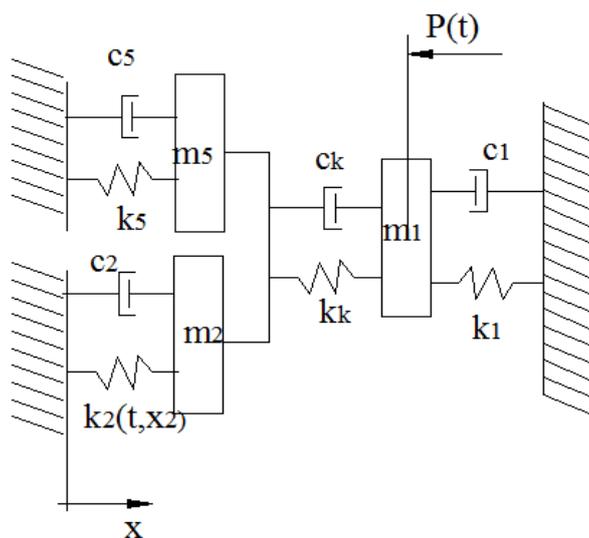


Рисунок 4 – Эквивалентная расчетная схема упругой системы алмазно-абразивной обработки тонкостенной оболочки вращения

Отдельно можно рассмотреть показатели, обозначенные как  $c_k, k_k$ , которые характеризуют динамические явления, происходящие в зоне контакта инструмента и изделия. Эти показатели зависят от свойств обрабатываемого материала заготовки, свойств инструмента, режимов резания.  $P(t)$  – гармоническая возмущающая сила, вызванная биением шлифовального круга и изменением его формы в процессе обработки.

$$P(t) = P_0 + \sum_{i=1}^n P_i \sin \omega t$$

где  $P_0$  – постоянная возмущающая сила, возникающая при работе правильно установленным шлифовальным кругом идеальной формы;  $i$  – гармоники, обусловленные:  $i = 1$  – дисбалансом (биением) круга из-за, например, неправильной его установки,  $i = 2$  – отклонением формы круга от идеальной;  $P_i$  – силы, вызванные перечисленными выше явлениями, возникающими в процессе шлифования;  $\omega$  – круговая частота.

Центры обрабатываемой заготовки, оправки и шпиндельного узла находятся в одной точке  $X_3$  (см. рис. 3) и лежат на одной оси  $Z$ , поэтому на эквивалентной схеме (см. рис. 4) обозначена приведенная масса  $m_5$  подсистемы «шпиндельный узел – оправка - деталь». Соответственно, приведенные жесткость и коэффициент демпфирования этой подсистемы обозначены как  $c_5$  и  $k_5$ .

В процессе обработки возбуждающая сила одновременно вызывает множество разных форм колебаний системы, среди которых основные, оказывающие влияние на качество обработки, это изгибные колебания подсистемы заготовки - оболочки и ее радиальные колебания. Поэтому в эквивалентной (расчетной) схеме в отдельном узле  $m_2$  представлена упруго-диссипативная характеристика обрабатываемой заготовки.

Силовой баланс для динамического описания технологической системы по эквивалентной схеме, представленной на рис. 4, можно представить в виде следующих дифференциальных уравнений.

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 = (c_1 - c_k) \dot{x}_1 + c_k \dot{x}_2 + (k_1 - k_k) x_1 + k_k x_2 - P(t) \\ m_2 \ddot{x}_2 = (c_k - c_2) \dot{x}_2 - c_k \dot{x}_1 + (k_2(t, x_2) + k_k) x_2 - k_k x_1 \\ m_5 \ddot{x}_5 = (c_k - c_5) \dot{x}_5 - c_k \dot{x}_1 + (k_k - k_5) x_5 - k_k x_1 \end{cases}$$

Результатом решения дифференциальных уравнений должны быть амплитуды относительных колебаний элементов технологической системы алмазно-абразивной обработки тонкостенной оболочки вращения.

Особенность рассматриваемой технологической системы состоит в том, что обрабатываемая деталь является тонкостенной оболочкой вращения, что накладывает дополнительные условия на моделирование технологической системы СПИД как динамической системы. Так фактически дифференциальное уравнение для  $m_2$  должно моделировать движение элемента оболочки, находящегося в зоне контакта шлифовального круга с деталью. Описание движения элемента оболочки возможно с применением теории оболочек после приведения рассматриваемой системы к дискретной модели. Для этого нужно определить условия, при которых возникают колебания оболочки во время обработки в рассматриваемой технологической системе.

На заготовку - тонкостенную оболочку, вращающуюся с постоянной частотой, во время шлифования воздействует локальная сосредоточенная периодическая сила (имеющая частоту возбуждающей силы), перемещающаяся вдоль оси детали со скоростью, соответствующей заданной подачи. Анализ литературы [7-9] показал, что это можно рассматривать как факт динамического воздействия подвижной нагрузки на поверхность оболочки,

вызывающего повышение амплитуды колебаний. Величины прогибов в системе, определяемые с учетом и без учета подвижности нагрузки, сильно различаются между собой. Для тонкостенных оболочек движение нагрузки вызывает резкое увеличение прогибов. Величина динамического прогиба зависит от параметров и геометрии оболочки, свойств материала, из которого она изготовлена, а также от скорости и направления движения нагрузки. Также решающую роль в возрастании амплитуды колебаний играет увеличение скорости движения нагрузки при перемещении от конической части детали к цилиндрической.

Вторым фактором, без учета которого невозможно построить математическую модель рассматриваемой технологической системы, является необходимость учета изменения жесткости системы с ростом напряжений в ее элементах, или учета эффективной жесткости [10], что представляет собой повышение или снижение способности конструкции сопротивляться действующим нагрузкам при изменении ее напряженного состояния. Этот эффект является следствием взаимовлияния продольных и поперечных прогибов в системе, и его обычно требуется учитывать при анализе тонкостенных конструкций, изгибная жесткость которых весьма мала по сравнению с жесткостью в продольном направлении. Переменная жесткость способствует возникновению параметрических колебаний тела оболочки, что также усложняет решение задачи

*Выводы.* Проведенные теоретические и экспериментальные исследования показали наличие вредных вибраций при шлифовании тонкостенных оболочек вращения из ситаллов. При этом величина и форма колебаний зависят не только от динамических характеристик металлорежущего оборудования и инструмента, но и от геометрии и упругих свойств обрабатываемой заготовки. Предложена эквивалентная схема упругой системы алмазно-абразивной обработки оболочек из ситалла, которую предполагается внести как основу при разработке математической модели системы шлифования с учетом динамического фактора. При моделировании будут учитываться упруго-диссипативные свойства обрабатываемой оболочки, а также факт динамического воздействия подвижной нагрузки на неё в процессе шлифования.

**Список использованных источников:** 1. Гусев В.В. Влияние виброустойчивости системы шлифования на структуру дефектного слоя ситаллов / В.В. Гусев, Л.П. Калафатова и др. // Резание и инструмент в технологических системах. Международный научно-техн. сборник. – Х., 2006. – Вып. 70. – С. 154-161. 2. Гусев В. В. Обоснование и разработка способа повышения производительной обработки изделий из ситаллов: автореферат дис. канд. техн. наук: 05.02.08 / Гусев Владимир Владленович. – М.: МВТУ, 1986.

– 18 с. **3.** Гусев В.В. Исследование динамических характеристик элементов системы СПИД при шлифовании деталей сложной пространственной формы из ситаллов / В.В. Гусев, Л.П. Калафатова и др. // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ, 2007. – Вип. №21. – С. 148 – 155. **4.** Калафатова Л.П. Влияние состояния элементов системы СПИД на виброустойчивость процесса шлифования крупногабаритных изделий из ситаллов / Калафатова Л.П., Каракуц И.С. и др. // Инженер. - Донецк: ДонНТУ, 2007. – Вип. 8. – С. 50-55. **5.** Гусев В.В. Повышение качества алмазного шлифования тонкостенных оболочек из ситалла путем снижения вибраций в технологической системе / Гусев В.В., Калафатова Л.П., Олейник С.Ю. // Наукові праці ДонНТУ– Донецк, 2010. – Вип. № 7(166).– С. 156-167. **6.** Тимошенко С. П. Колебания в инженерном деле / Тимошенко С. П., Янг Д. Х., Уивер У.— М.: Машиностроение, 1985. — 472 с. **7.** Вольмир А.С. Нелинейная динамика пластинок и оболочек / А.С. Вольмир. – М.: Наука, 1972. – 432 с. **8.** Гурьянов Н. Г. Замкнутая цилиндрическая оболочка под действием сосредоточенной силы / Исслед. по теор. пластин и оболочек. - Изд-во Казанского ун-та, Казань, 1966 .- Вып. 4. – С. 55–64. **9.** Якушев Н. З. Динамика тонких пластин и оболочек под воздействием движущихся инерционных нагрузок / Исследования по теории пластин и оболочек / Изд-во Казанского ун-та, Казань, 1973. – Вып. 10. – С. 391–401. **10.** Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти т. / Ред. совет: В. Н. Челомей (пред.). - Т. 1. Колебания линейных систем / Под ред. В. В. Болотина. - М.: Машиностроение, 1978. - 352 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Gusev V.V. Vlijanie vibroustojchivosti sistemy shlifovaniya na strukturu defektnogo sloja sitallov / V.V. Gusev, L.P. Kalafatova i dr. // Rezanie i instrument v tehnologicheskikh sistemah. Mezhdunarodnyj nauchno-tehn. sbornik. – Н., 2006. - Вып. 70. – S. 154-161. 2. Gusev V. V. Obosnovanie i razrabotka sposoba povysheniya proizvoditel'noj obrabotki izdelij iz sitallov: avtoreferat dis. kand. tehn. nauk: 05.02.08 / Gusev Vladimir Vladlenovich. – М.: MVTU, 1986. – 18 s. 3. Gusev V.V. Issledovanie dinamicheskikh harakteristik jelementov sistemy SPID pri shlifovanii detalej slozhnoj prostranstvennoj formy iz sitallov / V.V. Gusev, L.P. Kalafatova i dr. // Nadijnist' instrumentu ta optimizacija tehnologichnih sistem. Zbirnik naukovih prac'. – Kramators'k, 2007. – Vip. №21. – S. 148 – 155. 4. Kalafatova L.P. Vlijanie sostojaniya jelementov sistemy SPID na vibroustojchivost' processa shlifovaniya krupnogabaritnyh izdelij iz sitallov / Kalafatova L.P., Karakuc I.S. i dr. // Inzhener. - Doneck: DonNTU, 2007. – Vip. 8. – S. 50-55. 5. Gusev V.V. Povyshenie kachestva almaznogo shlifovaniya tonkostennyh obolochek iz sitalla putem snizheniya vibracij v tehnologicheskoy sisteme / Gusev V.V., Kalafatova L.P., Olejnik S.Ju. // Naukovi prac'i DonNTU– Doneck, 2010. – Vip. № 7(166).– S. 156-167. 6. Timoshenko S. P. Kolebaniya v inzhenernom dele / Timoshenko S. P., Jang D. X., Uiver U.— М.: Mashinostroenie, 1985. — 472 s. 7. Vol'mir A.S. Nelinejnaja dinamika plastinok i obolochek / A.S. Vol'mir. – М.: Nauka, 1972. – 432 s. 8. Gur'janov N. G. Zamknutaja cilindricheskaja obolochka pod dejstviem sosredotochennoj sily / Issled. po teor. plastin i obolochek. - Izd-vo Kazanskogo un-ta, Kazan', 1966 .- Вып. 4. – S. 55–64. 9. Jakushev N. Z. Dinamika tonkih plastin i obolochek pod vozdejstviem dvizhuvihsja inercionnyh na-gruzok / Issledovaniya po teorii plastin i obolochek / Izd-vo Kazanskogo un-ta, Kazan', 1973. – Вып. 10. – S. 391–401. 10. Vibracii v tehnike: Spravochnik. V 6-ti t. / Red. so-vet: V. N. Chelomej (pred.). - Т. 1. Kolebaniya linejnyh sistem / Pod red. V. V. Bolotina. - М.: Mashinostroenie, 1978. - 352 s.

УДК 621.9.06

**Ю. М. ДАНИЛЬЧЕНКО**, д-р техн. наук,  
**А. В. КРИВОШЕЯ**, канд. техн. наук, **А. О. КАРСЬКА**, Київ, Україна,  
**М. Г. СТОРЧАК**, д-р техн. наук,  
**С. І. ПАСТЕРНАК**, Штутгарт, Німеччина

## **ПЕРВИННА ГЕНЕРАЦІЯ КООРДИНАТНИХ КОДІВ МЕТАЛОРІЗАЛЬНИХ ВЕРСТАТІВ**

Розроблено процедуру первинної генерації координатних кодів металорізальних верстатів на основі опису геометрії відтворюючих ліній оброблюваних поверхонь із використанням матриць перетворення координат.

Разработана процедура первичной генерации координатных кодов металлорежущих станков на основе описания геометрии образующих линий обрабатываемых поверхностей.

*Ju. M. DANIL'CHENKO, A. V. KRIVOSHEJA, A. O. KARS'KA,  
M. G. STORCHAK, S. I. PASTERNAK*

*PRIMARY GENERATION OF COORDINATE CODES OF METAL-CUTTING MACHINE TOOLS*

The procedure of the initial coordinate codes generation of the metal cutting machine tools on the base of the machined surfaces generating lines geometry description is developed.

Головними вихідними умовами при проектуванні металорізальних верстатів є метод формоутворення, відповідна йому схема рухів та спосіб реалізації цих рухів у верстаті, закладений у його компоновці. При проектуванні більшості універсальних та багатоцільових верстатів в основному аналізуються лише можливі варіанти схем виконавчих рухів і компоновок, придатних для реалізації заданого методу формоутворення, але при розв'язку принципово нових завдань обробки, дуже важливою може стати сукупність всіх трьох вищезазначених факторів [1]. Отже актуальним стає і завдання розробки загального теоретичного підходу до математичного опису послідовних процедур структурного синтезу – від методу формоутворення до його реалізації в компоновці верстата.

На даний час виконання процедур структурного аналізу і синтезу компоновок базується на відомій, попередньо заданій сукупності виконавчих рухів вузлів верстату [2, 3, 4, 5]. Математичною основою цих процедур є характеристика відносних рухів цих вузлів, задана у вигляді координатних кодів або відповідних їм матриць перетворення координат [4]. В свою чергу загальна кількість формоутворюючих рухів верстата однознач-

но визначається видом інструменту, формою його різальних кромок та методом формоутворення геометричних відтворюючих ліній оброблюваної поверхні [6]. Тому, застосувавши до опису геометрії відтворюючих ліній математичний апарат перетворення координат, цілком можливо подати її у вигляді сукупності відносних рухів, що мають реалізовуватись виконавчими вузлами верстату. Фактично це означатиме можливість первинної генерації координатних кодів верстатів за функціями формоутворення формоутворюючої системи (ФС) верстату [4], отриманими на основі опису геометрії відтворюючих ліній оброблюваних поверхонь [6].

Метою цієї роботи є розробка процедури первинної генерації координатних кодів металорізальних верстатів лише на основі аналізу геометрії відтворюючих ліній оброблюваних поверхонь.

З точки зору забезпечення можливості того чи іншого виду обробки на верстаті, задачі аналізу і синтезу їх компоновок базуються на описі формоутворення заданих поверхонь із використанням заданого інструменту. В цьому випадку траєкторія відносного руху різучих точок інструмента в системі координат оброблюваної деталі пов'язується із переміщенням ланок ФС верстата і визначається із використанням лише матриць руху (матриць перетворення координат для суміжних ланок ФС верстата) [4]. Математична модель ФС верстата, або функція формоутворення  $\mathbf{r}_0$ , записується у вигляді:

$$\mathbf{r}_0 = A_{0,l} \cdot \mathbf{r}_l = A_{0,l} \cdot A_l \cdot \mathbf{e}^4 = \prod_{i=1}^l A_{i-1,i}^{k_i} q_i \cdot \prod_{j=l+1}^{l+p} A_{j-1,j}^{k_j} q_j \cdot \mathbf{e}^4, \quad (1)$$

де  $A_{0,l}$  – загальна матриця перетворення координат ФС верстата;  $\mathbf{r}_l$  – радіус-вектор формоутворюючих точок інструмента в системі координат інструмента (математична модель інструмента);  $A_l$  – матриця перетворення початкової точки інструмента;  $A_{i-1,i}^{k_i} q_i$  і  $A_{j-1,j}^{k_j} q_j$  – матриці перетворення координат для суміжних ланок ФС верстата і послідовних перетворень початкової точки інструмента;  $q_i$  і  $q_j$  – параметри руху  $i$ -ї ланки ФС верстата і  $j$ -го перетворення початкової точки інструмента;  $k_i$  і  $k_j$  – коди матриць перетворення координат,  $l$  і  $p$  – число рухомих ланок (вузлів) ФС верстата і перетворень початкової точки інструмента;  $\mathbf{e}^4 = 0,0,0,1^T$  – радіус-вектор початку системи координат інструмента.

Відповідно (1), функція формоутворення  $\mathbf{r}_0$  однозначно визначається координатним кодом  $k$ , що являє собою впорядкований перелік кодів  $k_i$  і  $k_j$  матриць перетворення

координат [4]. Зміна порядку цього переліку узгоджується властивостями матриць перетворення координат і є основою для синтезу нових компонок верстата [4]. Тобто синтез нових компонок верстата з однаковими формоутворюючими можливостями обмежується заданим складом його рухомих вузлів, та їх початковим взаєморозміщенням. З іншого боку форма запису (1) відповідає рівнянню поверхні у формоутворюючому вигляді, тобто рівнянню із  $l + p$  змінними, серед яких лише 2-і незалежні (криволінійні координати точок поверхні).

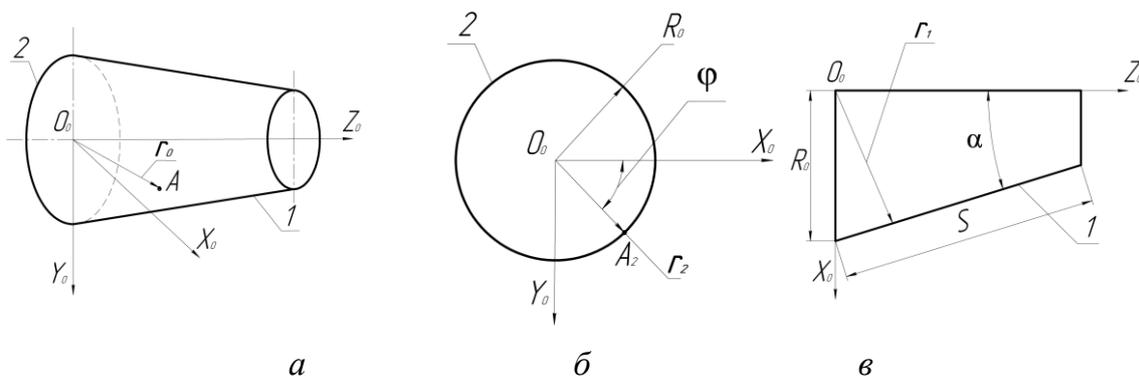


Рисунок 1 – Відтворюючі лінії конічної поверхні (а) та їх геометричні характеристики (б), (в): 1 – твірна відтворююча лінія; 2 – напрямна відтворююча лінія

Це дає підставу для розробки процедури синтезу, що базується на описі поверхні як результату відносного руху координатних (відтворюючих) ліній [6] з подальшим розмежуванням отриманих параметрів руху між верстатом та інструментом.

Розглянемо процедуру синтезу первинного координатного коду верстата на прикладі обробки деталі конічної форми.

Конічна поверхня утворюється шляхом руху твірної відтворюючої лінії 1 по напрямній відтворюючій лінії 2 (рис. 1), [6].

Запишемо рівняння цих ліній в системі координат поверхні із використанням матриць перетворення координат.

Напрямна лінія:  $\mathbf{r}_2 = A^6 \varphi \cdot A^1 R \cdot \mathbf{e}^4$ , або в розширеному вигляді

$$\mathbf{r}_2 = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & R \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R \cdot \cos \varphi \\ R \cdot \sin \varphi \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

де  $R$  – радіус основи конуса (постійний параметр);  $\varphi$  - кутова координата (незалежна змінна,  $0 \leq \varphi \leq 2\pi$ ).

Твірна лінія:  $\mathbf{r}_1 = A^1 R \cdot A^5 \alpha \cdot A^3 z \cdot \mathbf{e}^4$ , або в розширеному вигляді

$$\mathbf{r}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & R \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \alpha & 0 & -\sin \alpha & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \alpha & 0 & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R - z \cdot \sin \alpha \\ 0 \\ z \cdot \cos \alpha \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

де  $\alpha$  - половина кута конуса (постійний параметр);  $z$  - лінійна координата (незалежна змінна,  $0 \leq z \leq s$ ).

Виходячи із схеми формоутворення конуса (рис. 1), рівнянь відтворюючих ліній (2) і (3) та їх спільного параметра ( $R$ ), запишемо рівняння поверхні у вигляді функції формоутворення, як результату руху твірної лінії  $l$  по напрямній 2:

$$\mathbf{r}_0 = A_{0,1}^6 \varphi \cdot A_{1,2}^1 R \cdot A_{2,3}^5 \alpha \cdot A_{3,4}^3 z \cdot \mathbf{e}^4 = \begin{bmatrix} R - z \cdot \sin \alpha \cdot \cos \varphi \\ R - z \cdot \sin \alpha \cdot \sin \varphi \\ z \cdot \cos \alpha \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

В загальному вигляді рівняння (4) фактично визначає порядок і склад виконавчих рухів, необхідних для утворення конуса. При цьому змінні параметри рівняння (4) визначають склад формоутворюючих рухів, а постійних параметрів – установчих рухів у верстаті. Тоді, відповідно до форми запису рівняння (4), початковий координатний код верстату для обробки деталей конічної форми запишеться так:  $k = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 = 6153$ .

Переходячи від запису рівняння конуса у вигляді функції формоутворення (4) до можливих варіантів його формоутворення на верстаті, скористаймося записом цього ж рівняння у формі (1):

$$\mathbf{r}_0 = A_{0,l} \cdot \mathbf{r}_l = A_{0,l} \cdot A_l \cdot \mathbf{e}^4 = A_{0,1}^6 \varphi \cdot A_{1,2}^1 R \cdot A_{2,3}^5 \alpha \cdot A_{3,4}^3 z \cdot \mathbf{e}^4. \quad (5)$$

Виходячи з рівняння (5), максимальна кількість виконавчих вузлів верстата, необхідних для формоутворення конуса дорівнює чотирьом. При цьому загальна матриця перетворення координат ФС верстата  $A_{0,l} = A_{0,1}^6 \varphi \cdot A_{1,2}^1 R \cdot A_{2,3}^5 \alpha \cdot A_{3,4}^3 z$ , матриця перетворення початкової точки інструмента  $A_l = \text{diag } 1,1,1,1$ , математична модель інструмента  $\mathbf{r}_l = \mathbf{e}^4$ , координатний код ФС верстата  $k = 6153$ . Ці умови відповідають схемі поздовжнього точіння точковим інструментом (табл. 1).

Таблиця 1

Поздовжнє точіння точковим інструментом	Фасонне точіння лезовим прямобічним інструментом	Фасонне точіння лезовим не прямобічним інструментом	Штампування

Якщо прийняти математичну модель інструмента у вигляді  $\mathbf{r}_i = A^3 z \cdot \mathbf{e}^4$ , то загальна матриця перетворення координат ФС верстата стане  $A_{0,i} = A_{0,1}^6 \varphi \cdot A_{1,2}^1 R \cdot A_{2,3}^5 \alpha$  і координатний код ФС верстата –  $k = 615$ . Ці умови відповідають схемі фасонного точіння лезовим прямобічним інструментом (табл. 1).

Здійснюючи аналогічні процедури по ускладненню форми інструменту, отримаємо й ряд інших умов, які відповідають відомим схемам обробки (табл. 1), а саме:

– для схеми фасонного точіння лезовим не прямобічним інструментом

$$\mathbf{r}_i = A^5 \alpha \cdot A^3 z \cdot \mathbf{e}^4, A_{0,i} = A_{0,1}^6 \varphi \cdot A_{1,2}^1 R, k = 61;$$

– для схеми штампування

$$\mathbf{r}_i = A^6 \varphi \cdot A^1 R \cdot A^5 \alpha \cdot A^3 z \cdot \mathbf{e}^4, A_{0,i} = \text{diag } 1,1,1,1.$$

Для останнього випадку необхідно зауважити, що фактично форма поверхні вже закладена в інструменті (метод копіювання), тому з точки зору теоретичного формоутворення цієї поверхні, не потрібно здійснювати формоутворюючих рухів, а треба виконати лише установчий рух врізання [6], а саме рух поздовж осі  $Z$ . Тому для схеми штампування загальна матриця перетворення координат буде –  $A_{0,i} = A_{0,1}^3(z)$ , і координатний код ФС верстата –  $k = 3$ .

Таким чином первинну генерацію координатних кодів металорізальних верстатів цілком реально здійснювати за функціями формоутворення, отриманими на основі опису геометрії відтворюючих ліній оброблюваних поверхонь із використанням матриць перетворення координат.

Отримані таким чином координатні коди є базовими для подальшого синтезу компоновок верстатів [4], але не єдиними. Наприклад, в загальному випадку склад рухів функції формоутворення (4) можна змінити за рахунок заміни простих рухів складними із введенням додаткових зв'язків між параметрами цих рухів. Крім того відкритими залишаються питання корекції первинного координатного коду з умови реалізації різних методів формоутворення відтворюючих ліній [6] тощо. Саме це і буде предметом подальших розвідок.

#### *Висновки.*

1. Функції формоутворення, отримані на основі опису геометрії відтворюючих ліній оброблюваних поверхонь із використанням матриць перетворення координат однозначно співставляються з функціями формоутворення ФС верстата, що є основою для первинної генерації координатних кодів металорізальних верстатів.

2. Можливі координатні коди ФС верстата однозначно отримуються з функцій формоутворення шляхом перерозподілу параметрів руху між формоутворюючою системою верстата та інструментом.

**Перелік використаних джерел:** 1. Бушуев В.В. Основы конструирования станков. – М.: Станкин, 1992. – 520. 2. Врагов Ю.Д. Анализ компоновок металлорежущих станков. (Основы компонетики). – М.: Машиностроение, 1978. – 208 с.2. 3. Аверьянов О.И. Модульный принцип построения станков с ЧПУ. – М.: Машиностроение, 1987. – 232с. 4. Решетов Д.Н., Портман В.Т. Точность металлорежущих станков. – М.: Машиностроение, 1986. – 336 с. 5. T. Moriwaki Multi-functional machine tool // CIRP Annals - Manufacturing Technology, 57 (2008). – p.p. 736–749. 6. Федотенок А.А. Кинематическая структура металлорежущих станков. – М.: Машиностроение, 1970. – 408 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Bushuev V.V. Osnovy konstruirovaniya stankov. – М.: Stankin, 1992. – 520. 2. Vragov Ju.D. Analiz komponovok metallorezhuwih stankov. (Osnovy komponetiki). – М.: Mashinostroenie, 1978. – 208 s.2. 3. Aver'janov O.I. Mo-dul'nyj princip postroenija stankov s ChPU. – М.: Mashinostroenie, 1987. – 232s. 4. Reshetov D.N., Portman V.T. Tochnost' metallorezhuwih stankov. – М.: Mashino-stroenie, 1986. – 336 s. 5. T. Moriwaki Multi-functional machine tool // CIRP Annals - Manufacturing Technology, 57 (2008). – r.r. 736–749. 6. Fedotenok A.A. Kinematicheskaja struktura metallorezhuwih stankov. – М.: Mashinostroenie, 1970. – 408 s.

*Т.Г. ДЖУГУРЯН*, д-р техн. наук, *В.С. ПОПОВ*, Одесса, Украина

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПРИ СОВМЕЩЕННОМ РАСТАЧИВАНИИ СООСНЫХ ОТВЕРСТИЙ**

Наведено результати дослідження розточування співвісних отворів інструментом одностороннього різання. Представлена динамічна модель суміщеного розточування співвісних отворів. Отримано залежності для визначення зміщення осі отворів і їх відхилення від співвісності щодо базової поверхні і загальної осі. Встановлено закон розподілу і поле розсіювання відхилення від співвісності отворів відносно базової поверхні.

Приведены результаты исследования растачивания соосных отверстий инструментом одностороннего резания. Представлена динамическая модель совмещенного растачивания соосных отверстий. Получены зависимости для определения смещения оси отверстий и их отклонения от соосности относительно базовой поверхности и общей оси. Установлены закон распределения и поле рассеивания отклонения от соосности отверстий относительно базовой поверхности.

*T.G. DZHUGURJAN, V.S. POPOV*

### *DEFINITION OF LIMITING CONDITIONS OF TECHNOLOGICAL SYSTEM AT COMBINED INTERNAL TURNING COAXIAL APERTURES*

The results of investigation of coaxial holes boring with one-sided cutting tool are given. The dynamic model for combined boring of coaxial holes is presented. The formulas for determination of bored holes axis offset and for determination of misalignment of holes regarding to basic surface and to common axis are obtained. The law of distribution and the field dissipation of misalignment of holes regarding to basic surface are established.

**Введение.** В корпусных деталях машин, станков и приборов с последовательно расположенными отверстиями возникает необходимость обеспечения высоких требований к их соосности. Отделочную обработку таких отверстий, как правило, осуществляют с применением расточных инструментов одностороннего резания (РИОР), что позволяет уменьшить влияние технологического наследования предшествующей обработки, а также обеспечить наилучшие эксплуатационные показатели детали. Особенностью РИОР является наличие на каждой ступени инструмента последовательно расположенных режущих элементов (РЭ) и двух направляющих элементов (НЭ), воспринимающих усилия резания [1,2,3,4].

**Постановка проблемы.** Одним из основных показателей точности последовательно расположенных отверстий является отклонение от соосности относительно базовой поверхности, допустимое значение которого задается разработчиком на этапе проектирования корпусной детали и учитывается на этапе выбора рациональных конструкторско-технологических решений обработки РИОР [2,5,6]. Однако в процессе эксплуатации технологического оборудования условия обработки РИОР изменяются, что может привести к появлению брака. Изменение условий обработки связано не только с переменным припуском на обработку, полученным на предшествующей операции, но и с возможностью совмещенной обработки отверстий на отдельных участках их растачивания. Поэтому своевременное определение предельных состояний технологической системы (ТС) при обработке соосных отверстий РИОР является важной задачей.

**Анализ последних исследований и публикаций.** В предыдущих исследованиях разработаны модели формирования погрешностей расположения соосных отверстий в зависимости от условий их обработки РИОР. Установлено влияние неравномерности припуска на обработку на погрешность расположения осей отверстий, а также на амплитуду колебаний тока якоря привода главного движения постоянного тока (АКТП) [2,6,7]. Это позволило разработать экспресс оценку предельных состояний ТС в процессе растачивания соосных отверстий, основанную на контроле АКТП с частотой, соответствующей частоте вращения РИОР, и позволяющая производить диагностику состояния ТС с помощью системы ЧПУ [7].

Погрешность расположения осей соосных отверстий, возникающая при растачивании, зависит от параметров технологической системы и определяется смещением оси  $j$ -го отверстия на любом его  $N$ -ом уровне [6]:

$$e_{jN(1,2)} = b_{j(1,2)}^N \cdot e_{j0(1,2)} + \sum_{i=1}^{N-1} f_j(e_{i(1,2)}) \cdot b_{j(1,2)}^{N-1}, \quad (1)$$

где

$$b_{j(1,2)} = \frac{c_{O(1,2)}/m_k}{\sqrt{((c_k + c_{O(1,2)})/m_k - \omega^2)^2 + (\omega \cdot \xi_k / m_k)^2}}; \quad (2)$$

$$f_j(e_{i(1,2)}) = \frac{\Delta F_{O.N(1,2)}/m_k \pm g \cdot \cos \gamma}{\sqrt{((c_k + c_{O(1,2)})/m_k - \omega^2)^2 + (\omega \cdot \xi_k / m_k)^2}}; \quad (3)$$

$$N = L_i / S; \quad (4)$$

$e_{jN(1,2)}$  – минимальное и максимальное (соответственно индексы 1 и 2) смещение оси  $j$ -го отверстия на его  $N$ -ом уровне в двух предельных условиях обработки, м;  $e_{j0(1,2)}$  – смещение оси входного участка  $j$ -го отверстия отно-

сительно оси вращения инструмента в двух предельных условиях обработки, м;  $c_{O(1,2)} = 10^{-9}$  Н/м – коэффициент жёсткости контакта опорного НЭ с поверхностью обрабатываемого отверстия;  $c_k$  – коэффициент радиальной жёсткости системы “шпиндель – РИОР” в зоне вершины РЭ, Н/м;  $m_k$  – приведённая к вершине РЭ масса РИОР, кг;  $\omega$  – угловая частота колебаний, определяемая угловой скоростью вращения РИОР,  $c^{-1}$ ;  $\Delta F_{O,N(1,2)}$  – переменная составляющая радиальной силы, действующая на вершину опорного НЭ;  $\xi_k$  – коэффициент диссипативной силы системы “шпиндель – РИОР”, Н·с/м;  $\gamma$  – угол наклона оси РИОР, рад;  $g$  – ускорение свободного падения,  $m/c^2$ ;  $L_i$  – длина  $i$ -го отверстия, м;  $S$  – длина пути РИОР за один оборот.

Отклонение от соосности двух последовательно расположенных отверстий относительно базовой поверхности можно определить по формуле [6]:

$$e_{b,f(1,2)} = e_{1.0(1,2)} + (e_{1.N(1,2)} - e_{1.0(1,2)}) \cdot (L_1 + L_2 + L_0) / L_1 \pm \pm (e_{2.0(1,2)} + e_{2.N(1,2)}), \quad (5)$$

где  $e_{b,f(1,2)}$  – минимальное и максимальное (соответственно знаки «−» и «+») отклонение от соосности двух отверстий относительно базовой поверхности в двух предельных условиях обработки, м;  $e_{1.0(1,2)}$  и  $e_{2.0(1,2)}$  – смещения осей 1-го и 2-го отверстий соответственно в начале этих отверстий в двух предельных условиях обработки, м;  $e_{1.N(1,2)}$  и  $e_{2.N(1,2)}$  – смещения осей 1-го и 2-го отверстий соответственно на  $N$ -ом уровне этих отверстий в двух предельных условиях обработки, м;  $L_1$  и  $L_2$  – длины соответственно первого и второго обрабатываемых отверстий, м;  $L_0$  – расстояние между двумя соосными отверстиями, м.

Отклонение от соосности относительно общей оси в двух предельных условиях обработки для первого отверстия можно определить по формуле [6]:

$$e_{0.1(1,2)} = 0,5 e_{1.0(1,2)} + e_{1.N(1,2)} \cdot \quad (6)$$

Отклонение от соосности относительно общей оси в двух предельных условиях обработки для второго отверстия можно определить по формуле [6]:

$$e_{0.2(1,2)} = 0,5 e_{2.0(1,2)} + e_{2.N(1,2)} \cdot \quad (7)$$

Сравнение экспериментальных и теоретических данных параметров отклонения от соосности отверстий показывает, что на этапе совмещенной обработки отверстий использование зависимостей (1) – (4) не обеспечивает необходимой точности расчетов. Это связано с взаимовлиянием сил резания, возникающих на каждой ступени РИОР, на работу опорных НЭ, что

подтверждается исследованием профиля продольного сечения отверстий на участках перехода к совмещенной обработке. Поэтому возникает необходимость определения предельных состояний ТС при совмещенной обработке РИОР соосных отверстий.

**Постановка задачи.** Целью настоящей работы является разработка теоретических положений для определения предельных состояний ТС при совмещенной обработке РИОР соосных отверстий.

Для достижения поставленной цели в данной работе потребовалось решить следующие задачи: 1) разработать теоретические положения для определения предельных состояний ТС при совмещенной обработке соосных отверстий; 2) проверить адекватность полученных теоретических положений на основе экспериментальных данных; 3) установить закон распределения и поле рассеивания отклонений от соосности обработанных отверстий; 4) разработать рекомендации для своевременного выявления предельных состояний ТС, связанных с недопустимыми значениями неравномерного припуска на обработку.

**Основная часть.** Разработка теоретических положений для определения предельных состояний ТС при совмещенной обработке РИОР соосных отверстий осуществлялась на основе исследований результатов обработки заготовки детали «Фонарь», которая производится на ЗАО «Кислородмаш» (г. Одесса). Материал заготовки СЧ15 (ГОСТ1412-85), твердость 180 НВ. Заготовка содержит два соосных отверстия диаметрами 90 мм и 55 мм, точность которых должна соответствовать 7 качеству. Допуск соосности указанных отверстий относительно базовой поверхности 0,04 мм, а шероховатость поверхности не должна превышать  $Ra = 0,8$  мкм. На рис. 1 представлена заготовка детали «Фонарь» и технологическая схема ее обработки РИОР. Растачивание отверстий данной детали выполнялось на отделочно-расточном станке со скоростью резания 1 м/с, с подачей 0,3 мм/об и с глубиной резания 0,25 мм.

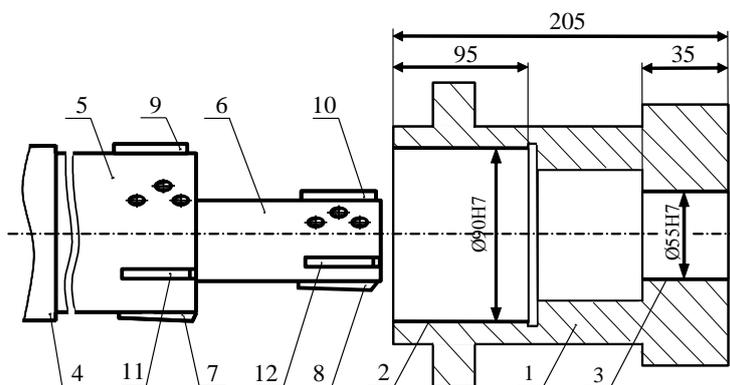


Рисунок 1 – Заготовка детали «Фонарь» и технологическая схема ее обработки РИОР: 1 – заготовка; 2, 3 – обрабатываемые поверхности отверстий; 4 – патрон шпинделя станка; 5, 6 – первая и вторая ступени РИОР; 7, 8 – РЭ первой и второй ступеней РИОР; 9, 10 и 11, 12 – опорные и боковые НЭ первой и второй ступеней РИОР

Растачивание первого отверстия диаметром 90 мм на длине до 55 мм от торца и на отрезке длины 90 мм – 95 мм осуществляется только первой ступенью РИОР. На отрезке длины первого отверстия 55 мм – 90 мм происходит совмещенное растачивание двух отверстий.

Анализ осциллограмм тока якоря привода главного движения постоянного тока в процессе растачивания отверстий заготовки детали «Фонарь» показал скачкообразное повышение установившегося значения АКТП при совмещенной обработке, что также подтверждает взаимовлияние сил резания на работу опорных НЭ. Следствием такого взаимовлияния является возрастание погрешности профиля продольного сечения (как правило, первого отверстия) и отклонения от соосности отверстий.

На рис. 2 показан типовой график изменения АКТП в процессе обработки заготовки детали «Фонарь». В момент времени  $\tau_1$  происходит врезание РЭ 7 в обрабатываемое первое отверстие 2 диаметром 90 мм. После окончания переходного периода начиная с момента времени  $\tau_2$  осуществляется процесс стабильного растачивания первого отверстия, при котором возможно незначительное повышение АКТП вследствие постепенного увеличения неравномерности припуска на обработку, связанного с его формированием на предшествующей операции.

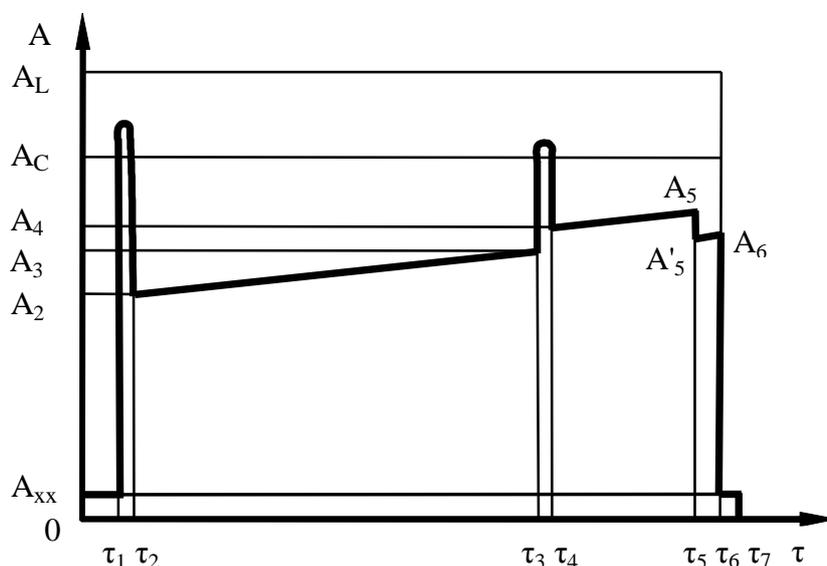


Рисунок 2 – Типовой график изменения АКТП в процессе обработки заготовки детали «Фонарь»

В момент времени  $\tau_3$  происходит врезание РЭ 8 в обрабатываемое второе отверстие 3 диаметром 55 мм, что характеризуется ростом АКТП. После окончания переходного периода начиная с момента времени  $\tau_4$  осуществляется процесс стабильного совмещенного растачивания первого 2 и

второго 3 отверстий, который также характеризуется возможным незначительным повышением АКТП вследствие постепенного увеличения неравномерности припуска на обработку. В момент времени  $\tau_5$  обработка второго отверстия 3 завершается и АКТП скачкообразно снижается со значения  $A_5$  до  $A'_5$ . На отрезке времени  $\tau_5 - \tau_6$  продолжается обработка первого отверстия 2. После выхода РЭ 7 первой ступени 5 РИОР в канавку АКТП снижается до уровня  $A_{ХХ}$  холостого вращения инструмента и в момент времени хода  $\tau_6$  производится остановка вращения РИОР с последующим его выводом из обработанных отверстий.

Для поддержания точности обработки и исключения поломок рабочей части РИОР, возникновения брака предусмотрены пороговые значения АКТП. Превышение порогового значения АКТП  $A_C$  при установившемся процессе обработки сигнализирует о превышении неравномерности припуска допустимых значений. Превышение порогового значения АКТП  $A_L$  связано с возникновением аварийной ситуации, связанной с дефектом заготовки, поломки инструмента, которая предусматривает немедленное прекращение процесса обработки.

В процессе обработки соосных ступенчатых отверстий с участком совмещенного растачивания в подавляющем большинстве случаев выполняются следующего условия:

$$A_2 \leq A_3; \quad (8)$$

$$A_3 < A_4; \quad (9)$$

$$A_4 \leq A_5; \quad (10)$$

$$A_5 < A'_5; \quad (11)$$

$$A'_5 \leq A_6, \quad (12)$$

где  $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A'_5, A_6$  – соответственно значения АКТП в моменты времени  $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4, \tau_5, \tau_6$  процесса обработки двух соосных отверстий, А.

Выполнение условий (9) и (11) связано с взаимовлиянием силовых полей, действующих на первую и вторую ступени РИОР. Для оценки степени такого влияния предложен коэффициент взаимовлияния  $k_V$ , который определяется с помощью выражения:

$$k_V = k_F A_4 / A_3, \quad (13)$$

где  $k_F$  – коэффициент, определяющий взаимосвязь отношения АКТП с силовым параметром обработки.

Для расчета погрешностей формирования оси первого отверстия на участках, определяемых моментами времени  $\tau_1 - \tau_3$  и  $\tau_5 - \tau_6$ , могут быть использованы зависимости (1) – (7). При совмещенной обработке двух отверстий (участки отверстий, моментами времени  $\tau_3 - \tau_5$ ) необходимо учитывать влияние силового поля второй ступени на силовое поле первой ступени. В этом случае выражение (3) примет вид:

$$f_j(e_{i(1,2)}) = \frac{k_V \Delta F_{O.N(1,2)} / m_k \pm g \cdot \cos \gamma}{\sqrt{((c_k + c_{O(1,2)}) / m_k - \omega^2)^2 + (\omega \cdot \xi_k / m_k)^2}}. \quad (14)$$

Таким образом, на участке первого отверстия, на котором производится совмещенная обработка, для расчета погрешности расположения оси отверстий необходимо использовать зависимости (1), (2), (4), (14).

Учитывая высокую жесткость короткой консольной части второй ступени по отношению к первой ступени РИОР, можно пренебречь влиянием ее относительных радиальных перемещений под действием силы резания, действующей на РЭ 8. С учетом этого положение отклонение от соосности двух отверстий относительно базовой поверхности при их совмещенной обработке можно определить по формуле:

$$e_{b.S(1,2)} = e_{1.N3(1,2)} + (e_{1.N5(1,2)} - e_{1.N3(1,2)}) \cdot (L_1 + L_2 + L_0 - L_3) / L_2, \quad (15)$$

где  $e_{b.S(1,2)}$  – минимальное и максимальное отклонение от соосности отверстий относительно базовой поверхности в двух предельных условиях обработки, м;  $e_{1.N3(1,2)}$  – смещение оси первого отверстия до начала совмещенной обработки (на длине  $L_3$  от переднего торца заготовки) в двух предельных условиях обработки, м;  $e_{1.N5(1,2)}$  – смещение оси первого отверстия в момент окончания совмещенной обработки, м;  $L_1 = 95$  мм и  $L_2 = 35$  мм – длины соответственно первого и второго обрабатываемых отверстий, м;  $L_0 = 75$  мм – расстояние между двумя соосными отверстиями, м.

Отклонение от соосности относительно общей оси в двух предельных условиях совмещенной обработки можно определить по формуле:

$$e_{0(1,2)} = 0,5 e_{b.S(1,2)} - e_{1.0(1,2)}. \quad (16)$$

Для проверки адекватности полученных зависимостей (15) и (16) были проведена опытная обработка заготовок детали «Фонарь» в двух предельных условиях обработки. При помощи расчётов, проведенных с помощью программы MathCAD, были получены минимальные и максимальные значения неравномерной глубины резания  $\Delta t_{\min} = 0,05$  мм и  $\Delta t_{\max} = 0,02$  мм, обеспечивающие требуемую точность соосности отверстий от-

носителю базовой поверхности. Указанные предельные значения неравномерности припуска достигались перемещением приспособления станка с корпусом заготовки детали «Фонарь» в горизонтальной плоскости после предварительного растачивания отверстий ступенчатой борштангой. Контроль перемещения приспособления осуществлялся двумя многооборотными индикаторными головками МИГ-2, установленными на магнитных штативах. На заключительном этапе контроль биения оправки и минимального (максимального) значения неравномерности глубины резания  $\Delta t_{\min} = 0,01$  мм ( $\Delta t_{\max} = 0,05$  мм) производился соответственно многооборотной индикаторной головкой МИГ-1 и рычажно-зубчатым индикатором ИРБПТ с ценой деления 0,002 мм (см. рис. 3).

Теоретические значения отклонения от соосности отверстий относительно базового первого отверстия в двух предельных условиях обработки следующие:  $e_{b.S(1)} = 3 \cdot 10^{-6}$  м,  $e_{b.S(2)} = 24 \cdot 10^{-6}$  м. Сравнение полученных экспериментальных и расчетных данных показало, что расхождение полученных значений не превышает 17%.

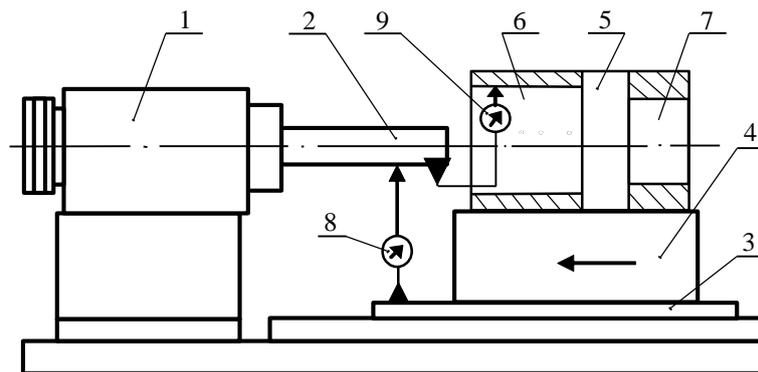


Рисунок 3 – Схема измерения величины биения оправки и неравномерности припуска отверстий: 1 – отделочно-расточная головка, 2 – оправка, 3 – подвижный стол станка, 4 – приспособление, 5 – заготовка, 6 и 7 – обрабатываемые отверстия заготовки, 8 и 9 – индикаторы

С целью определения закона распределения отклонения от соосности отверстий относительно базовой поверхности и поля допуска были проведены измерения параметром точности партии заготовок детали «Фонарь». В результате обработки данных отклонений от соосности отверстий в 50 деталях определены среднее значение  $e_{b.S(ср)} = 9,3$  мкм и величина стандартного отклонения  $\sigma = 4,6$  мкм. Предполагая в качестве гипотезы, что опытное распределение подчиняется закону эксцентриситета, находим теоретические значения частот  $m'_i$  и аргумент  $i$ -го интервала  $t_{\Theta,i}$  функции  $\varphi(t_{\Theta,i})$  с помощью выражений:

$$m_i' = 0,665 \cdot n \cdot d_N \cdot \varphi t_{\Delta,i} / \sigma; \quad (17)$$

$$t_{\Delta,i} = 0,665 \cdot d_C / \sigma, \quad (18)$$

где  $n = 50$  шт. – объем выборки;  $d_N = 3$  мкм – интервал, мкм;  $\varphi(t_{\Delta,i})$  – табличное значение функции нормированного распределения эксцентриситета;  $d_C$  – середина  $i$ -го интервала, мкм;  $\sigma$  – стандартное отклонение, мкм [8].

В таблице представлены результаты расчета опытных данных с использованием выражений (17) и (18), которые позволили определить значение критерия согласия Пирсона  $\eta = 1,92$ , что с учетом степени свободы 5 подтверждает правильность выбранной гипотезы [8].

На рис. 1 представлена гистограмма и кривая распределения эксцентриситета, полученные на основе данных таблицы. Визуальная оценка также подтверждает, что опытное распределение близко к теоретической кривой распределения эксцентриситета.

Поле рассеяния  $\Delta_p$  отклонения от соосности отверстий при распределении по закону эксцентриситета определим с помощью выражения:

$$\Delta_p = k_{\Delta} \cdot \sigma = 6,55 \cdot 4,6 \approx 30 \text{ мкм}, \quad (19)$$

где  $k_{\Delta} = 6,55$  – коэффициент, который определяется объемом выборки ( $n = 50$  шт.) и из предположения, что 99,73% всех деталей находится в пределах поля допуска [8].

Таблица – Опытные данные отклонений от соосности обработанных отверстий

№ интервала	Интервал, мкм		Середина интервала, мкм	Частота, $m_i$	$t_{\Delta,i}$	$\varphi(t_{\Delta,i})$	$m_i'$	$ m_i - m_i' $	$(m_i - m_i')^2$	$\eta = (m_i - m_i')^2 / m_i'$
	от	до								
1	0	3	1,5	4	0,2132	0,2082	4,4385	-0,439	0,19228	0,04332
2	3	6	4,5	9	0,6396	0,5215	11,118	-2,118	4,48408	0,40333
3	6	9	7,5	12	1,0659	0,604	12,876	-0,876	0,76796	0,05964
4	9	12	10,5	11	1,4923	0,49	10,446	0,5540	0,30688	0,02938
5	12	15	13,5	8	1,9187	0,3039	6,4787	1,5213	2,31444	0,35724
6	15	18	16,5	4	2,3450	0,15	3,1978	0,8022	0,64358	0,20126
7	18	21	19,5	2	2,7714	0,0597	1,2727	0,7273	0,52895	0,41561
8	21	24	22,5	0	3,1978	0,0192	0,4093	-0,4093	0,16754	0,40931
				50						$\Sigma=1,92$

На основе опытных данных установлена следующая взаимосвязь:

$$e_{b.s.i} \approx 0,5 k_M |A_{5.i} - A_{2.i}|, \quad (20)$$

где  $e_{b.s.i}$  – отклонение от соосности отверстий относительно базовой поверхности  $i$ -й детали, м;  $k_M$  – средневзвешенный коэффициент, м/А;  $A_{2.i}, A_{5.i}$  – значения АКТП соответственно в моменты времени  $\tau_2, \tau_5$  процесса обработки двух соосных отверстий  $i$ -й детали, А.

Система ЧПУ может идентифицировать предельное состояние ТС при совмещенном растачивании соосных отверстий на основе следующих условий:

$$0,5 \cdot 10^6 k_3 k_M |A_{5.i} - A_{2.i}| \geq T_{b.S}; \quad (21)$$

$$\Delta_{P.i} = k_{\Delta.i} \cdot \sigma_i \geq T_{\Delta}, \quad (22)$$

где  $T_{b.S}, T_{\Delta}$  – допуск соответственно на отклонение от соосности отверстий относительно базовой поверхности на поле рассеяния  $i$ -й детали, мкм;  $\Delta_{P.i}$  – поле рассеяния отклонения от соосности отверстий после обработки  $i$ -й детали, мкм;  $\sigma_i$  – стандартное отклонение после обработки  $i$ -й детали, мкм;  $k_3 = 1,2-1,3$  – коэффициент запаса;  $k_{\Delta.i}$  – коэффициент после обработки  $i$ -й детали, мкм.

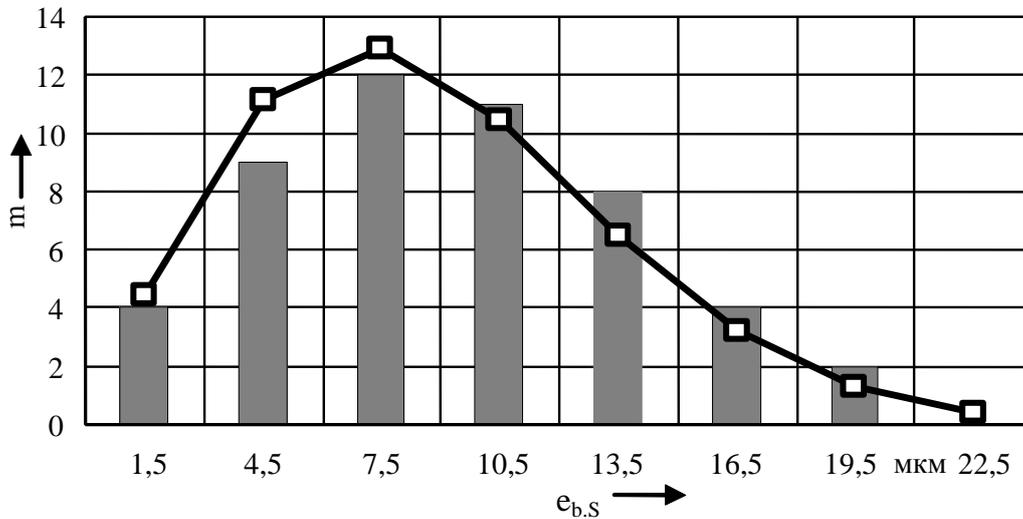


Рисунок 3 – Гистограмма и кривая распределения эксцентриситета

**Выводы.** Разработанные теоретические положения могут быть использованы для выявления системой ЧПУ предельного состояния ТС в процессе совмещенной обработке РИОР соосных отверстий, при достижении которого невозможно обеспечить требуемое значение параметра отклонения от соосности отверстий относительно базовой поверхности.

Технологический процесс обработки РИОР соосных отверстий в заготовке детали «Фонарь» обеспечивает необходимую точность, в том числе, по диаметральным размерам и шероховатости поверхности отверстий.

**Список использованных источников:** 1. *Линчевский П.А.* Обработка деталей на отделочно-расточных станках / *П.А. Линчевский, Т.Г. Джугурян, А.А. Оргиян.* – К.: Техника. – 2001. – 300 с. 2. *Джугурян Т.Г.* Комбинированная обработка координированных отверстий. – Одесса: АО БАХВА, 2003. – 108 с. 3. Инструменты для обработки точных отверстий / *С.В. Кирсанов, В.А. Грецишников, А.Г. Схиртладзе* и др. – М.: Машиностроение, 2003. – 330 с. 4. *Tuffentsammer K.* Präzisionsschneidwerkzeuge Die Herstellung und Bearbeitung Zylindrischer Innenflächen // *Techn. Zbl. prakt. für Metallbearb.* - 1981. - 36. - № 3. - S. 35-37, 39-42. 5. Технічні вимоги до геометрії виробів (GPS). Геометричні допуски. Допуски форми, орієнтації, розташування та биття : (ISO 1101:2004, IDT) : ДСТУ ISO 1101:2009 [Чинний з 2011-07-01]. – К. : Держспоживстандарт України, 2011. - 47 с. - (Національні стандарти України). 6. *Джугурян Т.Г., Попов В.С.* Повышение точности взаимного расположения растачиваемых ступенчатых отверстий // *Високі технології в машинобудуванні: Збірник наукових праць НТУ «ХПІ».* – Харків, 2007. – Вип. 1(13). – С. 45–50. 7. *Джугурян Т.Г.* Экспресс оценка предельных состояний технологической системы в процессе растачивания соосных отверстий / *Т.Г. Джугурян, В.С. Попов, Д.В. Ленский* // *Вісник ОДАБА.* – Одеса: ОДАБА, 2010. – Вип. 40. – С.64-70. 8. *Колкер Я.Д.* Математический анализ точности механической обработки деталей / *Колкер Я.Д.* - К.: Техника, 1976. - 200 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. *Linchevskij P.A.* Obrabotka detalej na otde-lochno-rastochnyh stankah / *P.A. Linchevskij, T.G. Dzhugurjan, A.A. Orgijan.* – K.: Tehnika. – 2001. – 300 s. 2. *Dzhugurjan T.G.* Kombinirovannaja obrabotka koordinirovannyh ot-verstij. – Odessa: AO BAHVA, 2003. – 108 s. 3. Instrumenty dlja obrabotki tochnyh otverstij / *S.V. Kirsanov, V.A. Grechishnikov, A.G. Shirtladze* i dr. – M.: Mashino-stroenie, 2003. – 330 s. 4. *Tuffentsammer K.* Präzisionsschneidwerkzeuge Die Herstellung und Bearbeitung Zylindrischer Innenflächen // *Techn. Zbl. prakt. für Metallbearb.* - 1981. - 36. - № 3. - S. 35-37, 39-42. 5. Tehnichni vimogi do geometrii virobiv (GPS). Geometrichni dopuski. Dopuski formi, orientacii, roztashuvannja ta bittja : (ISO 1101:2004, IDT) : DSTU ISO 1101:2009 [Chinnij z 2011-07-01]. – K. : Derzhspozhivstandart Ukraïni, 2011. - 47 s. - (Nacional'ni standarti Ukraïni). 6. *Dzhugurjan T.G., Popov V.S.* Povyshenie tochnosti vzaimnogo raspolozhenija rastachivaemyh stupenchatyh otverstij // *Visoki tehologii v mashinobuduvanni: Zbirnik naukovih prac' NTU «HPI».* – Harkiv, 2007. – Vip. 1(13). – S. 45–50. 7. *Dzhugurjan T.G.* Jekspress ocenka predel'nyh sostojanij teh-nologicheskoy sistemy v processe rastachivanija soosnyh otverstij / *T.G. Dzhugurjan, V.S. Popov, D.V. Lenskij* // *Visnik ODABA.* – Odesa: ODABA, 2010. – Vip. 40. – S.64-70. 8. *Kolker Ja.D.* Matematicheskij analiz tochnosti mehanicheskoy obrabotki detalej / *Kolker Ja.D.* - K.: Tehnika, 1976. - 200 s.

*ДЖ. КАПТАЙ*, д-р техн. наук, Мишкольц, Венгрия,  
*А. А. СИМОНОВА*, канд. техн. наук, Кременчуг, Украина,  
*Н. В. ВЕРЕЗУБ*, д-р техн. наук, Харьков, Украина

## **ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ СУБМИКРО- И НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МЕТАЛЛОВ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ**

Запропоновано алгоритм розрахунку для прогнозування поведінки субмікро- та нанокристалічних металів з різними розмірами зерен при дії температурного та часового факторів у процесі механічної обробки.

Предложен алгоритм расчета для прогнозирования поведения субмикрон- и нанокристаллических металлов с различными размерами зерен при воздействии температурного и временного факторов в процессе механической обработки.

*DZH. KAPTAJ, A. A. SIMONOVA, N. V. VEREZUB*  
*FORECASTING OF BEHAVIOUR SUBMICRO-AND NANOCRYSTALLINE METALS*  
*AT MACHINING*

The algorithm of calculation for predicting the behavior of submicron and nanocrystalline metals with different grain sizes under the influence of temperature and time factors in the process of machining.

В процессе механической обработки поверхностный слой детали испытывает со стороны режущего инструмента силовое и тепловое воздействие. Происходит упругопластическое деформирование поверхностного слоя и металл приобретает иные свойства, существенно отличающиеся от исходных.

Экспериментальные исследования [1-4], показали значительное влияние высокой температуры резания, возникающей во время обработки, и времени ее воздействия, на структурное и физическое состояние поверхностного слоя детали.

Сохранить высокие физико-механические свойства характерные для металлов с нано- и субмикрокристаллической структурой можно за счет сохранения исходной структуры металла заготовки. При этом необходимо подбирать такие методы и режимы обработки, которые бы обеспечивали требуемое, с точки зрения эксплуатационных свойств детали, качество поверхностного слоя.

Наноструктурные материалы надо рассматривать как представителей широкого класса дисперсных систем. Последние в физике определяются как гетерогенные системы с развитой внутренней поверхностью разделения между фазами, т.е. состоят из нескольких фаз. По агрегатному состоянию это может быть газ, жидкость или твердое тело. Дисперсные системы разделяют на грубодисперсные и тонкодисперсные. Для первых средний характерный размер элементов структуры больше  $10^{-6}$  м. Для тонкодисперсных систем он меньше  $10^{-6}$  м, а для ультрадисперсных систем – меньше  $10^{-7}$  м. Очевидно, что твердые ультрадисперсные структуры и есть наноструктурами, в которых характерные размеры структурных элементов отвечают диапазону  $10^{-9}$  -  $10^{-7}$  м [5].

В работах [6,7] предложена зависимость для определения размера зерна  $D$  (м) под влиянием температурного, временного факторов и исходного размера зерна

$$D = \sqrt{D_0^2 + 2 \cdot k \cdot \tau}, \quad (1)$$

где  $D_0$  – исходный размер зерна (м);  $\tau$  – время воздействия температуры (с);  $k$  – параметр интенсивности роста зерна ( $\text{м}^2/\text{с}$ ).

Для диапазона температур до  $200^\circ\text{C}$  параметр интенсивности роста зерна описывается экспоненциальным уравнением [8]

$$k = \exp\left(-\frac{G_L}{RT}\right), \quad (2)$$

где  $G_L$  – энергия активации роста зерна (Дж);  $R$  – газовая постоянная (Дж/моль·К);  $T$  – температура нагрева (К);

Зависимость (2) для нано- и субмикроструктурных материалов дает неудовлетворительные результаты, так как энергия активации роста зерна в нанокристаллических материалах, как правило, выше, чем в крупнокристаллических аналогах, за счет повышенной диффузии на границах зерен и возможности их блокировки [9].

Структура границ зерен сильно отличается от структуры решетки, соответственно и границы зерен имеют совершенно другие свойства – свойства псевдоаморфной структуры [4].

В зависимости (1) необходимо уточнить параметр интенсивности роста зерна  $k$  с учетом структурных особенностей нано- и субмикроструктурных материалов.

Поиск параметра интенсивности роста зерна осуществлен для технически чистых нано- и субмикроструктурных металлов.

Рассмотрим нано- и субмикрористаллический металл как ультрадисперсную систему. Любая дисперсная система стремится к уменьшению своей поверхностной энергии, что описывается зависимостью Кельвина [10]

$$G = G^0 + 2 \cdot V_m \cdot \frac{\sigma}{R_{cp}}, \quad (3)$$

где  $G$  – средняя молярная энергия Гиббса одного зерна (Дж/моль),  $G^0$  – молярная энергия Гиббса материала (Дж/моль),  $\sigma$  – энергия на межзеренных границах (Дж/м<sup>2</sup>), [11],  $V_m$  – молярный объем материала (м<sup>3</sup>/моль),  $R_{cp}$  – средний радиус зерна (м).

Из формулы (3) следует, что увеличение среднего радиуса зерна постепенно уменьшает энергию Гиббса и представляет собой движущую энергию для роста зерна.

Движущая сила процесса роста зерна может быть рассчитана при выборе произвольного направления движения роста зерна с использованием зависимости [12]

$$F_{dr} = -\frac{dG}{dR_g}, \quad [\text{Н/моль}], \quad (4)$$

где  $G$  – средняя молярная энергия Гиббса одного зерна (Дж/моль),  $R_g$  – радиус зерна (м).

Подставляя зависимость (3) в формулу (4) и преобразовывая, получаем

$$F_{dr} = \frac{2 \cdot V_m \cdot \sigma}{R_g^2}, \quad (5)$$

где  $V_m$  – молярный объем материала (м<sup>3</sup>/моль),  $\sigma$  – энергия на межзеренных границах (Дж/м<sup>2</sup>), [13],  $R_g$  – радиус зерна (м).

Физические величины в зависимости (5) положительны и величина движущей силы положительна, таким образом, можно сделать вывод, что движущееся зерно растет (происходит увеличение среднего радиуса зерна  $R_g$ ).

Для упрощения зерно рассматривается как сфера, тогда молярная площадь поверхности зерна  $A_m$ , равна

$$A_m = \frac{A}{V} \cdot V_m = \frac{4 \cdot \pi \cdot R_g^2}{\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R_g^3} \cdot V_m = \frac{3 \cdot V_m}{R_g}, \quad [\text{м}^2/\text{моль}], \quad (6)$$

где  $V_m$  – молярный объем материала (м<sup>3</sup>/моль),  $R_g$  – радиус зерна (м).

Разделив движущую силу роста зерна  $F_{dr}$  из зависимости (5) на молярную площадь поверхности зерна  $A_m$ , получим движущую силу единицы площади поверхности межзеренной границы  $F_{dr,A}$

$$F_{dr,A} = \frac{F_{dr}}{A_m} = \frac{2 \cdot \sigma}{3 \cdot R_g}, [\text{Н/м}^2]. \quad (7)$$

Преобразуем зависимость (7). Для этого умножаем знаменатель на величину молярной площади поверхности  $\omega$  ( $\text{м}^2/\text{моль}$ ), то есть величину площади одноатомной поверхности, покрытой 1 молем атомов и делим на число Авогадро  $N_{Av}$  (1/моль) – число атомов на 1 моль. Таким образом, определим движущую силу, действующую на поверхности одного атома  $F_{dr,a}$

$$F_{dr,a} = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \omega}{3 \cdot N_{Av} \cdot R_g}, [\text{Н/атом}]. \quad (8)$$

Если атомы находятся в одноатомном слое, то формула молярной площади поверхности имеет вид [14]

$$\omega = f \cdot V_m^{2/3} \cdot N_{Av}^{1/3}, \quad (9)$$

где  $f$  – безразмерный геометрический параметр (равен приблизительно 1)

Подставляем зависимость (8) в формулу (9), получаем уравнение движущей силы роста зерна, действующей на каждый атом

$$F_{dr,a} = f \cdot \frac{2 \cdot \sigma}{3 \cdot R_g} \cdot \left( \frac{V_m}{N_{Av}} \right)^{2/3}, [\text{Н/атом}]. \quad (10)$$

Движущая сила, приводящая к росту зерна, действует на каждый атом вдоль границ зерен и выталкивает атомы на поверхность в радиальном направлении. Во время этого движения зерна растут. Как следует из зависимости (10), движущая сила обратно пропорциональна размеру зерна. Движущая сила различна для разных видов материалов и зависит от энергии межзеренных границ и молярной массы.

Рассмотрим силу, тормозящую движение атомов, т.е. препятствующую росту зерна. Уравнение Стокса [15] может быть описано силой сопротивления, которая действует в обратном направлении относительно движения атомов

$$F_{drag} = -6 \cdot \pi \cdot R_a \cdot \eta^* \cdot v, \quad (11)$$

где  $\eta^*$  – эффективная вязкость твердого материала ( $\text{Нс/м}^2$ ),  $R_a$  – радиус движущегося атома (м),  $v$  – скорость движение атома (м/с) через твердый металл.

Отрицательный знак зависимости (11) показывает, что сила сопротивления  $F_{drag}$ , действует против движущей силы  $F_{dr,a}$  со скоростью движущегося атома  $v$ .

Атомные границы зерен будут двигаться со скоростью устойчивого состояния, если суммарные силы, действующие на границы, будут равны нулю, т.е. выполняется следующие условие:  $F_{dr,a} + F_{drag} = 0$ . (12)

Подставляя условие (12) в формулы (8 и 9), скорость можем выразить через скорость устойчивого состояния движущихся границ зерна,  $v_{ss}$

$$v_{ss} = \frac{f}{9 \cdot \pi \cdot R_a \cdot \eta^*} \cdot \frac{\sigma}{R_g} \cdot \left( \frac{V_m}{N_{Av}} \right)^{2/3}, \text{ [м/с]}. \quad (13)$$

Зависимость (13) описывает скорость устойчивого состояния движущихся атомов и растущих границ зерна. Определение этой скорости описывается как

$$v_{ss} \equiv \frac{dR_g}{d\tau}, \quad (14)$$

где  $\tau$  – время (с).

Подставим зависимость (13) в формулу (14):

$$\frac{dR_g}{dt} = \frac{k}{R_g}, \quad (15)$$

где  $k$  – интенсивность роста зерна ( $\text{м}^2/\text{с}$ ), определяется по зависимости

$$k = \frac{f \cdot \sigma}{9 \cdot \pi \cdot R_a \cdot \eta^*} \cdot \left( \frac{V_m}{N_{Av}} \right)^{2/3}. \quad (16)$$

На основании теории дисперсных систем получены дифференциальные уравнения (15), позволяющие определить интенсивность роста зерна в зависимости от исходного размера зерна металла.

Зависимость (15) является простым дифференциальным уравнением, которое может быть проинтегрировано, если границы интегрирования находятся в следующих пределах:

1. при  $t = 0$ ,  $R_g = R_g^0$  – исходный радиус границы зерна,
2. при конечном значении  $t$  – радиус границы зерна достигает величины  $R_g$ .

Проинтегрировав уравнение (16), получим

$$R_g = R_g^0 \cdot \sqrt{1 + \frac{2 \cdot k}{(R_g^0)^2} \cdot \tau}. \quad (17)$$

Как следует из зависимости (15), рост границы зерна будет пропорционален квадрату корня времени. Поскольку эта зависимость нелинейная, то интенсивность роста зерна не может быть определена единичной величиной.

Определяем коэффициент роста зерна,  $CF$ , можно как соотношение фактического размера зерна к исходному размеру зерна

$$CF \equiv \frac{R_g}{R_g^0}. \quad (18)$$

Используя зависимость (17), определяем коэффициент роста зерна

$$CF = \sqrt{1 + \frac{2 \cdot k}{(R_g^0)^2} \cdot \tau}. \quad (19)$$

В зависимости (19) показано, что коэффициент роста зерна зависит от интенсивности роста зерна  $k$ , определенного уравнением (16).

Выразим энергию межзеренных границ через поверхностное натяжение жидких сплавов  $\sigma_{lg}$  [16]. Энергия межзеренных границ зависит в значительной мере от взаимной ориентации двух соседних зерен. Когда зерна образуют ядро, их взаимная ориентация совершенно случайна. В этом положении, больше чем 90% межзеренных границ будут иметь максимальную граничную энергию, что составляет приблизительно 1/3 поверхностной энергии. С другой стороны поверхностная энергия твердых сплавов на 15% выше, чем поверхностное натяжение жидких сплавов [14]. Исходя из этого

$$\sigma \cong \frac{1,15}{3} \cdot \sigma_{lg}. \quad (20)$$

Поверхностное натяжение жидких металлов может быть представлено как [14]

$$\sigma_{lg} = \frac{\Delta H_{lg} - T \cdot \Delta S_{lg}}{\omega}, \quad (21)$$

где  $\Delta H_{lg}$  – поверхностная избыточная энтальпия (Дж/моль);  $\Delta S_{lg}$  – поверхностная избыточная энтропия (Дж/моль·К).

Поверхностную избыточную энтальпию опишем как определенное соотношение энтальпии связи жидкости

$$\Delta H_m = -\alpha \cdot H_c, \quad (22)$$

где  $\alpha$  – безразмерное соотношение нарушенной связи на поверхности (= 0,182 [14]);  $H_c$  – энтальпия связи жидкого металла (Дж/моль).

Энтальпия связи жидкого металла может быть получена пропорционально точке плавления металла, по меньшей мере, в группах металлов, имеющих подобные твердые и жидкие структуры

$$H_c = -q \cdot R \cdot T_m + C_p \cdot T - T_m, \quad (23)$$

где  $q$  – безразмерный, полуэмпирический параметр (= 25,4±2 ) [14];  $R$  – универсальная газовая постоянная (Дж/моль·К);  $C_p$  – теплоемкость жидкого металла (Дж/моль·К).

В первом приближении принимаем поверхностную избыточную энтропию равной нулю. Таким образом, подставляя зависимости (21-23) и зависимость (9) в формулу (20), получим следующее соотношение

$$\sigma \cong \frac{1,15 \cdot \alpha}{3 \cdot f} \cdot \frac{R \cdot T_m \cdot \left[ q + \frac{C_p}{R} \cdot \left( 1 - \frac{T}{T_m} \right) \right]}{V_m^{2/3} \cdot N_{Av}^{1/3}}. \quad (24)$$

Зависимость (3.24) позволяет определить энергии межзеренных границ. В этом уравнении теплоемкость твердого металла выражена через  $C_p$ .

Эффективная вязкость твердого металла оценена через уравнение Стокса-Эйнштейна [12]

$$\eta^* = \frac{R \cdot T}{6 \cdot \pi \cdot R_a \cdot N_{Av} \cdot D_s}, \quad (25)$$

где  $D_s$  – коэффициент самодиффузии в твердом металле (м<sup>2</sup>/с).

Согласно [12] коэффициент самодиффузии определяется как

$$D_s \cong 10^{-4} \cdot \exp \left( - p + z \cdot \frac{T_m}{T} \right). \quad (26)$$

Параметром  $p$ , зависит от структуры кристаллической решетки ( $p = 14$  (ОЦК),  $p = 17$  (ГЦК и ГПУ) и  $p = 21$  (для прямого проводника, такого как Ge, Si),  $z$  – валентность металла [12].

Подставим зависимости (24), (25) в формулу (13), при этом  $\alpha = 0,182$ ,  $q = 25,4$ , получим

$$k \cong 0,046 \cdot \frac{T_m}{T} \cdot \left[ 25,4 + \frac{C_p}{R} \cdot \left( 1 - \frac{T}{T_m} \right) \right] \cdot D_s. \quad (27)$$

Интенсивность роста зерна пропорциональна коэффициенту диффузии в твердом металле. Подставляем зависимость (26) в формулу (27), получим

$$k \cong 4,6 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{T_m}{T} \cdot \left[ 25,4 + \frac{C_p}{R} \cdot \left( 1 - \frac{T}{T_m} \right) \right] \cdot \exp\left( -p + z \cdot \frac{T_m}{T} \right). \quad (28)$$

Разница теплоемкости между различными металлами имеет небольшое влияние на величину  $k$ , так  $C_p/R = 4,5 \pm 1,5 \ll 25,4$ . Определяем интенсивность роста зерна для параметра  $q = 25,4$  при  $T/T_m = 0,5$ .

Таким образом, окончательная формула, полученная для интенсивности роста зерна, когда границы зерен проявляют свойства кристаллических твердых тел, имеет вид

$$k_c \cong 1,3 \pm 0,5 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{T_m}{T} \cdot \exp\left( -p + z \cdot \frac{T_m}{T} \right). \quad (29)$$

Как видно из формулы (29), интенсивность роста зерна зависит только от безразмерной температуры ( $T/T_m$ ), структуры и валентности твердого металла ( $p$  и  $z$ ).

Обобщенная формула интенсивности роста зерна при проявлении границами зерен кристаллических свойств выводится как

$$k \cong A \cdot \frac{T_m}{T} \cdot \exp\left( -B \cdot \frac{T_m}{T} \right), \quad (30)$$

где  $A = (1,3 \pm 0,5) \cdot 10^{-4}$  ( $\text{м}^2/\text{с}$ ),  $B = p + z$ ,  $z$  – валентность металла.

Однако полагается, что средняя упорядоченность и плотность области границы зерен подобна аморфным твердым телам, что может быть получено экстраполированием свойств жидкости. Тогда радиус атома выражается через его молярный объем, взятый в счет коэффициента упаковки кристаллической решетки  $f_b = 0,45$  [17]

$$R_a = \left( \frac{3 \cdot f_b \cdot V_m}{4 \cdot \pi \cdot N_{Av}} \right)^{1/3}. \quad (31)$$

Значение динамической вязкости определяют по формуле [14]:

$$\eta^* = A \cdot \frac{M^{1/2}}{V_m^{2/3}} \cdot T^{1/2} \cdot \exp\left(B \cdot \frac{T_m}{T}\right), \quad (32)$$

где  $\eta$  – динамическая вязкость ( $\text{м}^2/\text{с}$ ),  $M$  – атомная масса ( $\text{кг}/\text{моль}$ ),  $T_m$  – температура плавления данного металла ( $\text{К}$ ).

Уравнение (32) проверено на 101 измеренной точке 15-ти отобранных жидких металлах и среднее значение основного действительного полумпирического параметра определено как:  $A = (1.80 \pm 0.39) \cdot 10^{-8}$  ( $\text{Дж} \cdot \text{К}^{-1} \cdot \text{моль}^{-1/3}$ )<sup>1/2</sup> и  $B = 2.34 \pm 0.20$ .

Следующее выражение получено для параметра  $k$ , с учетом аморфных свойств границ зерен металлов с нано- и субмикрорекристаллической структурой

$$k_a = (8.5 \pm 3) \cdot 10^{-9} \cdot \frac{V_m^{1/3} \cdot T_m}{M^{1/2} \cdot T^{1/2}} \cdot \exp\left[-(2.34 \pm 0.20) \cdot \frac{T_m}{T}\right], \quad (33)$$

где молярный объем выражен как [10]

$$V_m = V_m^o \cdot 1 + \beta \cdot (T - T_m) . \quad (34)$$

Формулы (30) и (33) корректны для металлов, исходный размер зерна которых находится в диапазоне 100÷500нм, при воздействии температур, которые не превышают температуру плавления исследуемого металла.

Для нахождения размера зерна, полученного в результате воздействия на нано- или субмикрорекристаллическую структуру температурного и временного факторов, предложен следующий алгоритм состоящий из следующих этапов:

1. Выбираем металл с исходным размером зерна  $D_0$  (м), необходимыми данными для расчета является температура  $T$  (К) и время воздействия температуры  $\tau$  (с).
2. Рассчитываем интенсивность роста зерна  $k$  для данного металла.
3. Рассчитываем окончательный размер зерна и  $D_g$  (м) по формуле (1).

С целью получения достоверного прогноза интенсивности роста зерна нано- и субмикрорекристаллических металлов и величины размера зерна после рекристаллизации для любых чистых металлов необходимо найти минимально две экспериментальные точки.

Рассчитываем интенсивность роста размера зерна  $k$  по формуле (30), которое учитывает кристаллическую структуру границ зерен ( $c-k$ ), и по уравнению(33), которое учитывает аморфную структуру границ зерен ( $a-k$ ).

Используя экспериментальные данные для субмикроструктурированного титана, полученные в работе [1]. Структура титана при температуре ниже 1155К является ГПУ, т.е. величина  $p = 17$ . Его валентность может быть  $z = 2; 3$  или  $4$ , берем среднее значение  $z = 3$ , тогда  $B = (p + z) = 20$  [16]. Точка плавления титана  $T_m = 1941\text{К}$  [17]. Для чистого Ti:  $M = 0,04788$  кг/моль,  $V^0 = 11,6 \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup>/моль [18],  $\beta = 0,56 \cdot 10^{-4}$  1/К [17].

Точки 1, 2, 3 для титана (рис.1) получены в работе [1]. Экспериментальные данные для СМК титана, т.4 (рис.1): исходный размер зерна 250нм, время 0,01с, температура 1160К, окончательный размер зерна 400нм.

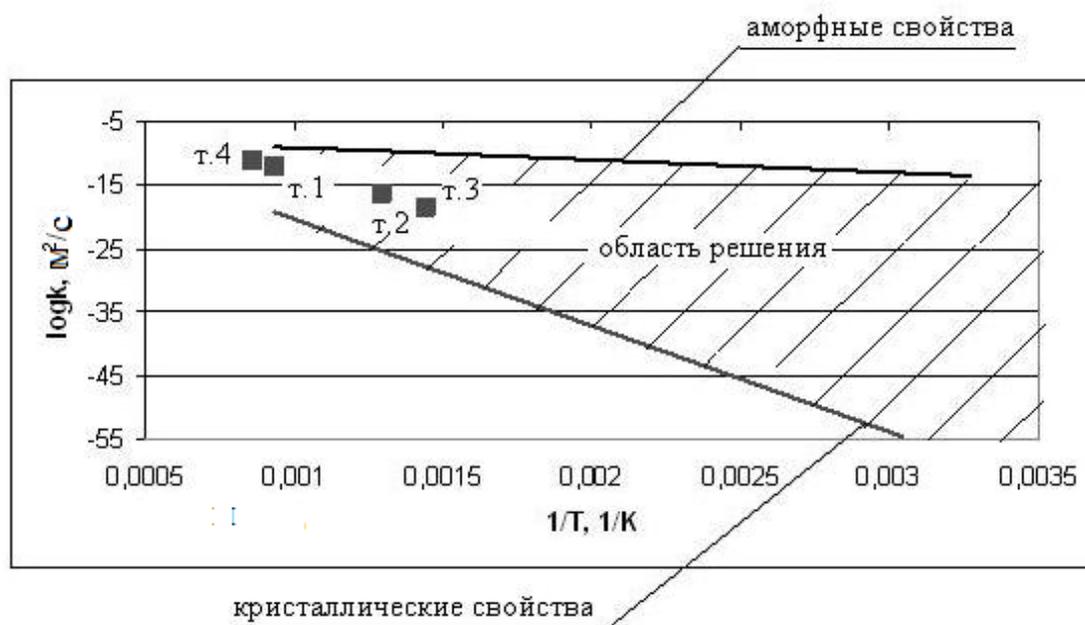


Рисунок 1 – Область решения для поиска интенсивности роста зерна для СМК титана

Экспериментальные данные для чистой меди приведены в работе [2]. Структура меди – ГЦК, т.е. величина  $p = 17$ . Ее валентность может быть  $z = 1$  или  $2$ , берем среднее значение  $z = 1,5$ , тогда  $B = (p + z) = 18,5$  [16]. Точка плавления  $T_m = 1356\text{К}$  [17]. Для чистой меди:  $M = 0,06355$  кг/моль,  $V^0 = 7,96 \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup>/моль [18],  $\beta = 1,0 \cdot 10^{-4}$  1/К [17].

Точки 2, 3, 4 для меди (рис.2) получены в работе [2]. Экспериментальные данные для СМК меди (рис.2): т.1 (исходный размер зерна 250нм, время 0,72с, температура 580К, окончательный размер зерна 1000нм), т.5 (исходный размер зерна 250нм, время 4,3с, температура 535К, окончательный размер зерна 500нм).

Значения, полученные в представленной работе, находятся на одной линии со значениями, которые получены другими исследователями, что подтверждает корректность полученных результатов.

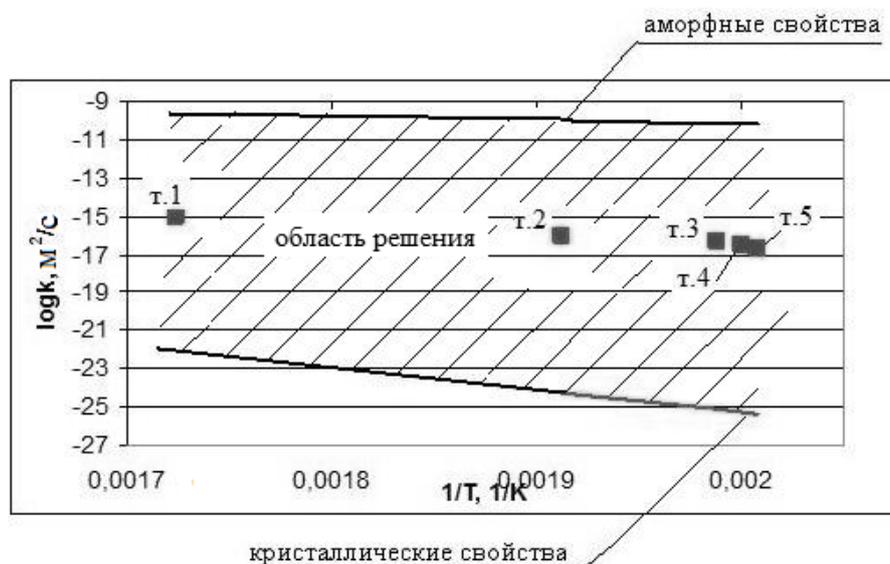


Рисунок 2 – Область решения для поиска интенсивности роста зерна для СМК меди

### Заключение

На основании теории дисперсных систем и металловедения разработан алгоритм расчета, позволяющий прогнозировать интенсивность роста размера зерна под воздействием температурного, временного факторов и исходного размера зерна. В результате теоретического обоснования расчета получены аналитические зависимости интенсивности роста зерна. При расчете необходимо учитывать особенности строения границ зерен металлов с нано- и субмикроструктурной структурой, полученных методом интенсивной пластической деформации, которые проявляют как кристаллические, так и аморфные свойства твердых тел.

**Список использованных источников:** 1. Салищев Г.А. Влияние пластической деформации и рекристаллизационного отжига на плотность технического титана / Г.А. Салищев, С.П. Мальшева, Р.М. Галеев // ФММ. – 1996. – Т.82, №2. – С. 117-127. 2. Чувильдеев В.Н. Рекристаллизация в микрокристаллических меди и никеле, полученных методами РКУ-прессования. I. Структурные исследования. Эффект аномального роста / В.Н. Чувильдеев, В.И. Копылов, А.В. Нохрин и др. // ФММ. – 2003. – Т.96, №5. – С. 51-60. 3. Дегтярев М.В. Рост зерна при отжиге армко-железа с ультрадисперсной структурой различного типа, созданной деформацией сдвигом под давлением / М.В. Дегтярев, Л.М. Воронова, Т.И. Чащухина // ФММ. – 2005. – Т.99, №3. – С. 58 – 68. 4. Валиев Р. З. Наноструктурные материалы, полученные методом интенсивной пластической деформацией / Р. З. Валиев, И. В. Александров. - М.: Логос, 2000. - 272 с. 5. Скороход В.В. Фізико-хімічна кінетика в наноструктурних системах / В.В. Скороход, І.В. Уварова, А.В. Рагуля. – К.: Академперіодика, 2001. – 180с. 6. Porter D.A. Phase transformations in metals and alloys / D.A. Porter, K.E. Easterling – Nelson: Thornes, 1992. 7. Geiger J. Simulation of Grain Coarsening in Two Dimensions by Cellular-automaton / J. Geiger, A. Roosz, P. Barkoczy // Acta Mater. – 2001. – 49. – P.623-629. 8. Greger M. Ultrafine Grained Copper by Equal Channel Angular Extrusion Processing / M. Greger, R. Kocich, B. Kuretova, M. Vlcek // Acta Metallurgica. – 2007. – 13. – P.561-569. 9. Adamson A.W. Physical Chemistry of Surfaces / A.W. Adamson. – NY.: John Wiley and Sons Inc., 1990. 10.

*Millett P.C.* Atomistic simulation of grain boundary energetics - effects of do pants / *P.C. Millett, R.P. Selvam, S. Bansal, A. Saxena* // *Acta mater.* – 2005. – V.53. – P. 3671-3678. **11.** *Kaptay G.* Classification and general derivation of interfacial forces, acting on phases, situated in the bulk, or at the interface of other phases / *G. Kaptay* // *J. Mater. Sci.* – 2005. – V.40. – P. 2125-2131. **12.** *Kaptay G.* Modeling Interfacial Energies in Metallic Systems / *G. Kaptay* // *Materials Science Forum.* – 2005. – V. 473-474. – P. 1-10. **13.** *Poirier D.R.* Transport Phenomena in Materials Processing / *D.R. Poirier, G.H. Geiger.* – Warrentable: TMS, 1994. – 658 p. **14.** *Glicksman M.E.* Grain boundary structure and energetic / *M.E. Glicksman, R.A. Masumura* // *Metal. Trans.A.* – 1977. – V.8A. – P. 1373-1381. **15.** *Kaptay G.* A new theoretical equation for temperature dependent self-diffusion coefficient of pure liquid metals / *G. Kaptay* // *Int J. Mater Res.* – 2008. – V.99. – P. 14-17. **16.** *Sutton A.P.* Interfaces in Crystalline Materials / *A.P. Sutton, R.W. Balluffi* – Oxford: Clarendon Press, 1995. **17.** *Iida T.* The Physical Properties of liquid Metals / *T. Iida, R.I.L. Guthrie.* – Oxford: Clarendon Press, 1993. – 288p. **18.** *Kaptay G.* A unified equation for the viscosity of liquid metals / *G. Kaptay* // *Z. Metallkd.* – 2005. – V.96. – P. 24-31.

**Bibliography (transliterated):** 1. Saliwev G.A. Vlijanje plasticheskoj deformacii i rekristalizacionnogo otzhiga na plotnost' tehničeskogo titana / G.A. Saliwev, S.P. Malysheva, R.M. Galeev // *FMM.* – 1996. – T.82, №2. – S. 117-127. 2. Chuvil'deev V.N. Rekristalizacija v mikrokristallicheskih medi i nikele, poluchennyh metodami RKU-pressovanija. I. Strukturnye issledovanija. Jeffekt anomal'nogo rosta / V.N. Chuvil'deev, V.I. Kopylov, A.V. Nohrin i dr. // *FMM.* – 2003. – T.96, №5. – S. 51-60. 3. Degtjarev M.V. Rost zerna pri otzhige armko-zheleza s ul'tradispersnoj strukturoj različnogo tipa, sozdannoj deformaciej sdvigom pod davleniem / M.V. Degtjarev, L.M. Voronova, T.I. Chawuhina // *FMM.* – 2005. – T.99, №3. – S. 58 – 68. 4. Valiev R. 3. Nanostrukturnye materialy, poluchennye metodom intensivnoj plasticheskoj deformaciej / R. 3. Valiev, I. V. Aleksandrov. - M.: Logos, 2000. - 272 s. 5. Skorohod V.V. Fiziko-himichna kinetika v nanostrukturnih sistemah / V.V. Skorohod, I.V. Uvarova, A.V. Ragulja. – K.: Akadempriodika, 2001. – 180s. 6. Porter D.A. Phase transformations in metals and alloys / D.A. Porter, K.E. Easterling – Nelson: Thornes, 1992. 7. Geiger J. Simulation of Grain Coarsening in Two Dimensions by Cellular-automaton / J. Geiger, A. Roos, P. Barkoczy // *Acta Mater.* – 2001. – 49. – P.623-629. 8. Greger M. Ultrafine Grained Copper by Equal Channel Angular Extrusion Processing / M. Greger, R. Kocich, B. Kuretova, M. Vlcek // *Acta Metallurgica.* – 2007. – 13. – P.561-569. 9. Adamson A.W. Physical Chemistry of Surfaces / A.W. Adamson. – NY.: John Wiley and Sons Inc., 1990. 10. Millett P.C. Atomistic simulation of grain boundary energetics - effects of do pants / P.C. Millett, R.P. Selvam, S. Bansal, A. Saxena // *Acta mater.* – 2005. – V.53. – P. 3671-3678. 11. Kaptay G. Classification and general derivation of interfacial forces, acting on phases, situated in the bulk, or at the interface of other phases / G. Kaptay // *J. Mater. Sci.* – 2005. – V.40. – P. 2125-2131. 12. Kaptay G. Modeling Interfacial Energies in Metallic Systems / G. Kaptay // *Materials Science Forum.* – 2005. – V. 473-474. – P. 1-10. 13. Poirier D.R. Transport Phenomena in Materials Processing / D.R. Poirier, G.H. Geiger. – Warrentable: TMS, 1994. – 658 p. 14. Glicksman M.E. Grain boundary structure and energetic / M.E. Glicksman, R.A. Masumura // *Metal. Trans.A.* – 1977. – V.8A. – R. 1373-1381. 15. Kaptay G. A new theoretical equation for temperature dependent self-diffusion coefficient of pure liquid metals / G. Kaptay // *Int J. Mater Res.* – 2008. – V.99. – P. 14-17. 16. Sutton A.P. Interfaces in Crystalline Materials / A.P. Sutton, R.W. Balluffi – Oxford: Clarendon Press, 1995. 17. Iida T. The Physical Properties of liquid Metals / T. Iida, R.I.L. Guthrie. – Oxford: Clarendon Press, 1993. – 288p. 18. Kaptay G. A unified equation for the viscosity of liquid metals / G. Kaptay // *Z. Metallkd.* – 2005. – V.96. – P. 24-31.

***С. Н. ЛАВРИНЕНКО***, канд. техн. наук, Харьков, Украина

## **ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АЛМАЗНОГО ЛЕЗВИЙНОГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ ОБРАБОТКЕ БИМЕДИЦИНСКИХ ПОЛИМЕРОВ**

У технологічних процесах лезової обробки аморфних термопластичних полімерних матеріалів біомедицинського та оптичного призначення використання у якості інструментального матеріалу природного монокристала алмаза є вирішальним фактором, який зумовлює якість поверхневого шару, що формується у процесі контрольованого спрямованого руйнування, яка забезпечує високий рівень експлуатаційних характеристик готових виробів.

В технологических процессах лезвийной обработке аморфных термопластичных полимерных материалов биомедицинского и оптического назначения использование в качестве инструментального материала природного монокристалла алмаза является решающим фактором, который определяет качество формируемого в процессе контролируемого направленного разрушения поверхностного слоя, обеспечивая высокий уровень эксплуатационных характеристик готовых изделий.

*S. N. LAVRINENKO*

### *FEATURES OF APPLICATION THE DIAMOND EDGE CUTTING TOOL AT PROCESSING BIOMEDICAL POLYMERS*

Using of natural monocrystal diamond as cutting tool material in technological process of single-point cutting of amorphous thermoplastic polymeric materials for biomedical and optical application is the decisive factor which determined the surface layer quality by directional controlled fracture of polymer and provided the high level of operating characteristics of complete product.

При лезвийной обработке аморфных термопластичных полимерных материалов биомедицинского и оптического назначения выбор инструментального материала и определение оптимальных геометрических параметров режущего клина является решающим фактором, который определяет качество формируемого в процессе контролируемого направленного разрушения поверхностного слоя. Полученное качество обработанной поверхности в свою очередь определяет эффективность эксплуатационных показателей готового изделия – характеристики водопоглощения и смачиваемости, поверхностного электрохимического потенциала, показатели по-

верхностного и внутреннего отражения оптических лучей, светопотери в поверхностном слое, радиационную стойкость и долговечность и др.

Влияние инструментального материала на качество образующегося поверхностного слоя полимерных изделий определяется физико-химическим взаимодействием инструментального и обрабатываемого материалов. Низкая твердость термопластичных полимеров, характер их деформации и разрушения в процессе резания, предполагает кинематическое копирование аморфным обрабатываемым материалом поверхностной структуры инструментального материала. Таким образом, инструментальный материал, обладающий более упорядоченной поверхностной структурой и, следовательно, минимальной шероховатостью режущей кромки, будет обеспечивать стабильно высокое качество обработанной поверхности. Причем упорядоченность этой структуры должна сохраняться возможно более длительное время, а сама поверхность - обладать низкими адгезионными свойствами, предотвращающими налипание частиц обрабатываемого материала и связанные с этим нарушения поверхностного слоя.

Считается, что режущий клин алмазного инструмента после оптимальной заточки и тщательной доводки имеет радиус округления режущей кромки в пределах  $\rho = 0,5...1,5$  мкм. Но в реальности это не радиус, а геометрически развитый микрорельеф с большим количеством "сверхострых" микрокромки, что видно при исследовании режущей кромки на атомарно-силовом микроскопе (рис. 1).

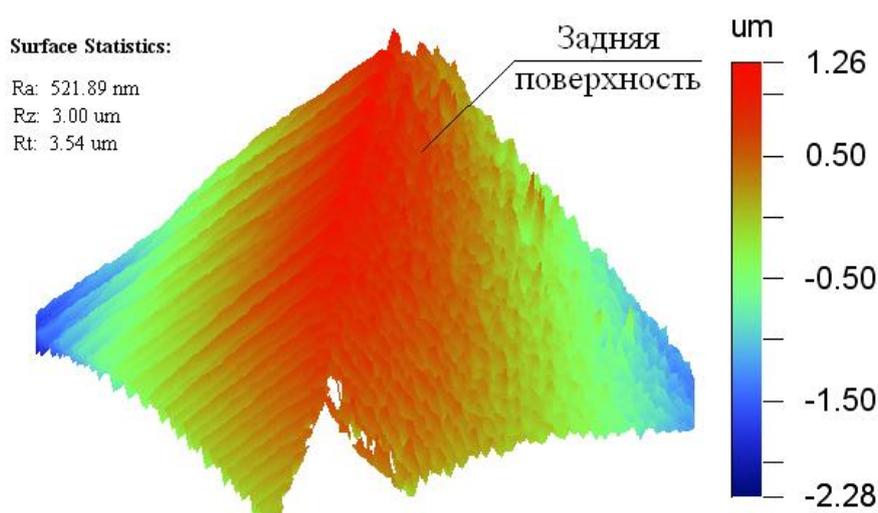


Рисунок 1 – Профиль режущей кромки инструмента из природного монокристалла алмаза

Очень четко наличие "сверхострых" режущих кромок, составляющих главную режущую кромку наблюдается на топограммах и профилограммах участков передних поверхностей алмазных резцов различных фирм-производителей с различным качеством доводки и различной геометрией режущей части, которые представлены на рисунке 2.

Как результат, мы имеем взаимодействие определенного количества "сверхострых" микрокромки, расположенных по периметру участка главной режущей кромки режущего клина с обрабатываемым полимерным материалом. Эти микрокромки определяют характер направленного разрушения и формируют микро- и наногеомерию обработанной поверхности аморфных полимеров. При малых сечениях среза микрогеометрический характер высоты и расположения микрокромки на задней поверхности алмазного резца практически без искажения копируется на обработанной им поверхности полимера.

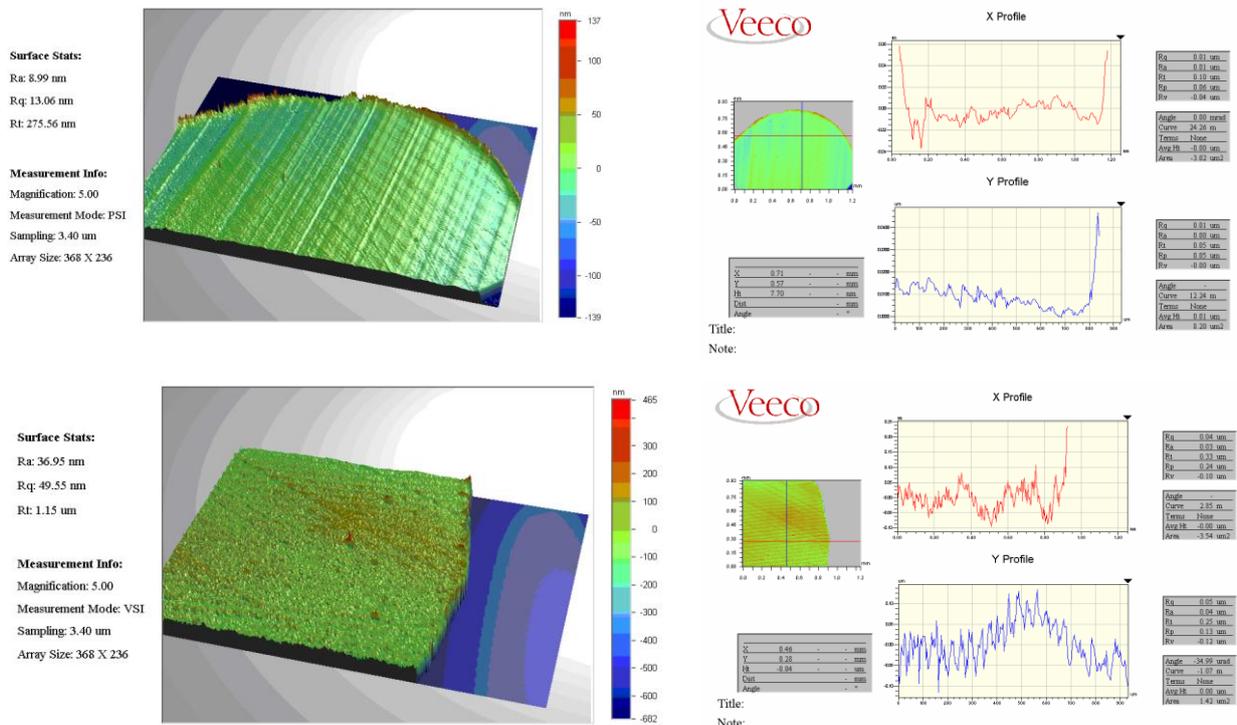


Рисунок 2 – Топограммы и профилограммы участков передних поверхностей алмазных резцов со "сверхострыми" режущими кромками, составляющими главную режущую кромку

Для сравнения резцовая вставка серийного производства, оснащенная искусственным алмазным сверхтвердым материалом марки СКМ-Р, передняя поверхность которой представлена на рисунке 3, имеет более развитый рельеф поверхности по сравнению с природным алмазом и имеет

"заваленную" режущую кромку, что можно трактовать как выраженный радиус ее округления. Еще более четко радиус при вершине наблюдается у доведенной резцовой вставки из мелкозернистого твердого сплава марки ВК6М (см. рис. 4).

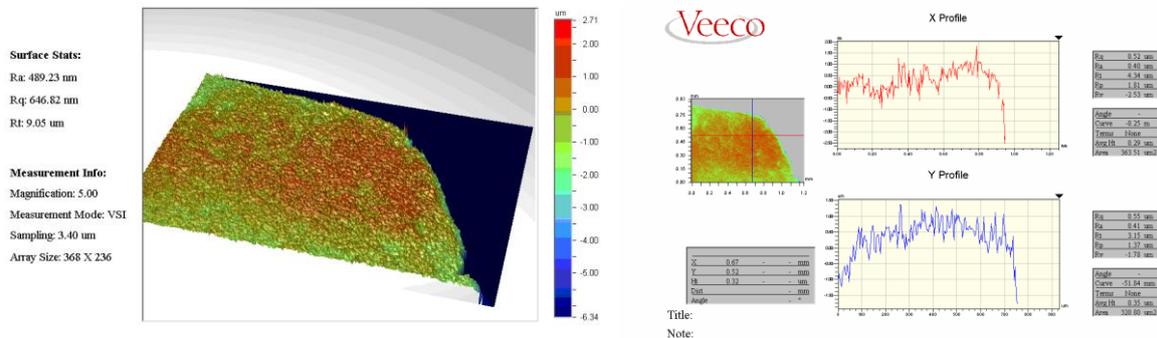


Рисунок 3 – Топограмма и профилограммы передней поверхности доведенной резцовой вставки, оснащенной СКМ-Р

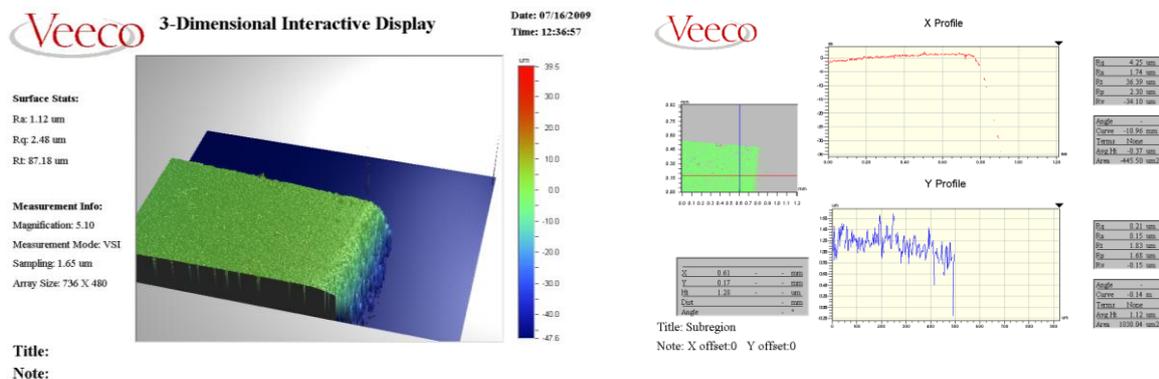


Рисунок 4 – Топограмма и профилограммы передней поверхности резцовой вставки из мелкозернистого твердого сплава марки ВК6М

В результате исследования большого числа различных резцовых алмазных вставок ведущих мировых производителей, а также на основании анализа различных информационных источников [1-5], автором был сделан вывод, что наилучшими эксплуатационными свойствами обладают инструменты, оснащенный резцовой вставкой из природного остробедренного монокристалла алмаза октаэдрического габитуса, относящегося к типу II б по физической классификации и отобранного по специальной методике с учетом его кристаллографических и диэлектрических характеристик при условии отсутствия фотолюминесценции. Таким образом, монокристаллы алмаза для изготовления ультрапрецизионного инструмента должны отбираться по специальной методике, которая бы обеспечивала соблюдение перечисленных выше требований. Резцовые вставки из таких монокристаллов при правильной пространственной ориентации являются наи-

более прочными, обладают однородной структурой кристаллической решетки без посторонних включений и высоким коэффициентом низкотемпературной теплопроводности  $\lambda_{\text{IIб}}=1,9 \cdot 10^3$  Вт/(м·К) при  $T=320^\circ\text{K}$  [6, 7], на порядок превышающим общепринятые справочные данные ( $\lambda_{\text{спр}}=146,5$  Вт/(м·К) [8, 9]), которые являются, видимо, усредненными для всех типов кристаллов алмаза. Следует отметить, что в данном случае именно низкотемпературная теплопроводность алмаза имеет решающее значение, так как уровень температур в зоне резания оптических полимеров не должен превышать критическую температуру начала тепловой реструктуризации макромолекулярных линейных комплексов (например,  $T_k \approx 350^\circ\text{K}$  для полистирола), являющейся границей перехода стеклообразного аморфного полимера в вязко-текучее состояние.

На рис. 5 представлена профилограмма передней грани, а на рис. 6 - задней поверхности привершинной зоны резцовой вставки из природного монокристалла алмаза, отобранного из партии вставок исходя из изложенного выше принципа соответствия монокристалла алмаза типу II б, со следующими геометрическими параметрами режущей части: передний угол  $\gamma = 0^\circ$ , главный задний угол  $\alpha = 12^\circ$ , радиус при вершине  $r = 1,5$  мм.

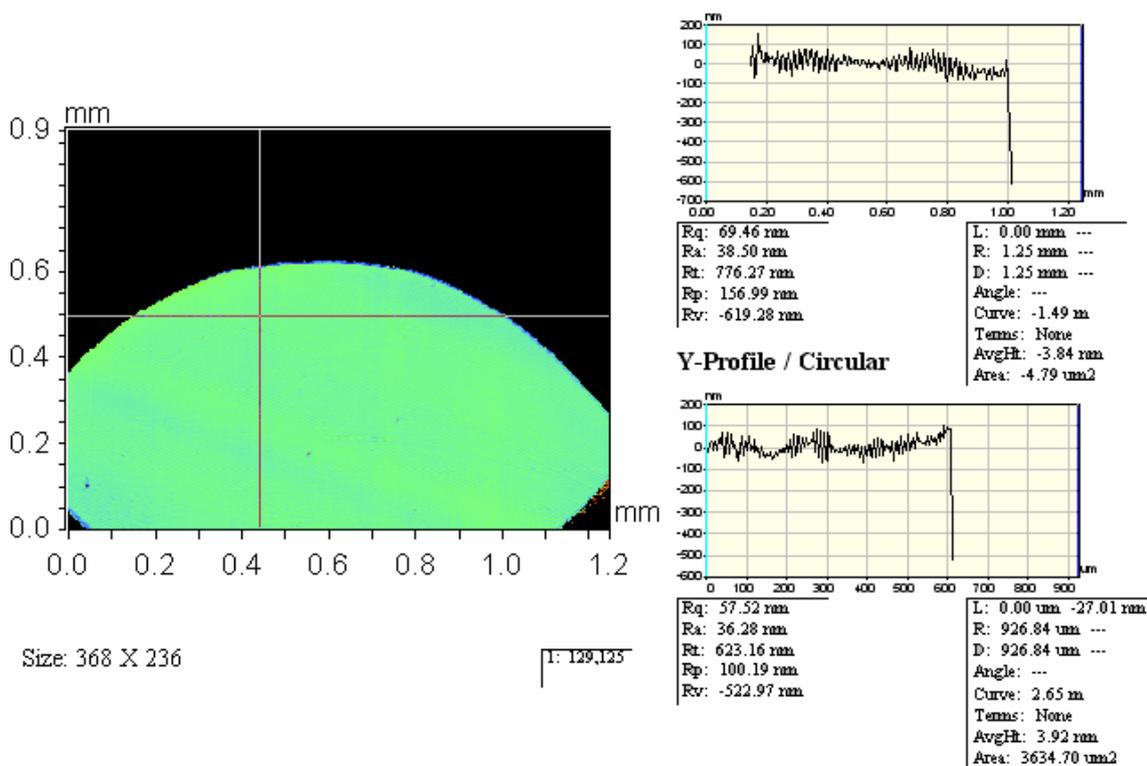


Рисунок 5 – Профилограмма передней поверхности алмазной вставки, оснащенной монокристаллом алмаза типа IIб

По результатам профилометрирования шероховатость передней поверхности по параметру среднеарифметического отклонения профиля составляет  $Ra = 38,5$  нм по оси  $x$  и  $Ra = 36,28$  нм по оси  $y$ , а значение шероховатости задней поверхности  $Ra = 27,91$  нм.

На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что в макромасштабе аморфные термопластичные полимеры копируют участок главной режущей кромки алмазного резца, а в микро- и нанoshкале, мы имеем очень сложную картину этого взаимодействия, которая усложняется такими факторами, как вибрации и периодический характер процесса направленного разрушения снимаемого слоя, а также другими факторами.

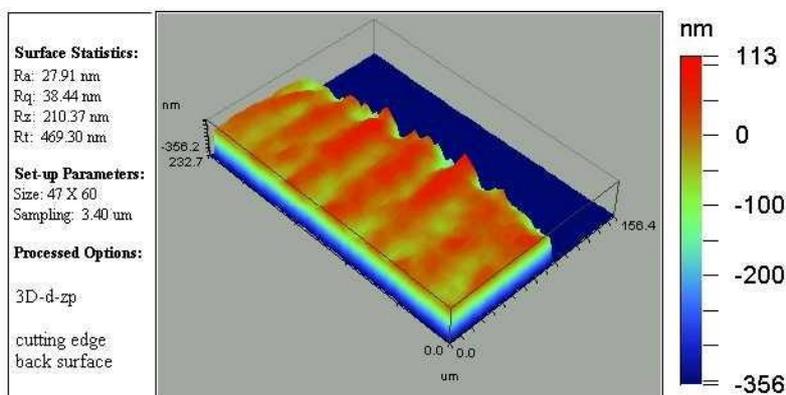


Рисунок 6 – Профилограмма задней поверхности алмазной вставки, оснащенной монокристаллом алмаза типа Пб

Следует отметить, что применение ультрапрецизионного инструмента из специально отобранного монокристалла природного алмаза с высоким качеством доводки режущих граней позволяет обеспечивать высокие эксплуатационные показатели готовых изделий биомедицинского назначения, определяемые характеристиками сформированного поверхностного слоя полимера, а именно: низкий уровень водопоглощения, смачиваемости и поверхностного электрохимического потенциала; высокие показатели поверхностного и внутреннего отражения оптических лучей; низкие светопотери в поверхностном слое; высокую радиационную стойкость и долговечность готового изделия.

Учитывая относительно высокую стоимость инструмента из природного монокристалла алмаза, можно рекомендовать на операциях черновой лезвийной обработки специально доведенные резцовые вставки, оснащенные СКМ-Р, или использовать мелкозернистый твердый сплав. При этом следует отметить, что при использовании твердого сплава достаточно легко обеспечить большую величину переднего угла ( $\gamma = 5...10^\circ$ ), который

обеспечивает более эффективное контролируемое направленное разрушение снимаемого слоя обрабатываемого полимерного материала и позволяет уменьшить уровень остаточных внутренних напряжений в обработанном поверхностном слое.

**Список использованных источников:** 1. *Карбань В.И.* Анизотропия обрабатываемости монокристаллов / В.И. Карбань, В.В. Рогов, А.И. Карбань и др. // Сверхтвердые материалы. – 1981. – № 2. – С. 14–17. 2. *Несмелов А.Ф.* Алмазные инструменты в промышленности / Несмелов А.Ф. – М.: Машиностроение, 1964. – 343 с. 3. *Новиков Н.В.* Трещиностойкость монокристаллов алмаза / Н.В. Новиков, С.Н. Дуб, В.И. Мальцев // Сверхтвердые материалы. – 1992. – № 5. – С. 6–11. 4. *Hurt H.H.* Tribological Considerations of the Diamond Single-Point Tool / H.H. Hurt, D.L. Decker // Proc. of the SPIE. – 1984. – Vol. 508. – P.126–131. 5. *Yuan Z.J.* Effect of Diamond Tool Sharpness on Minimum Cutting Thickness and Surface Integrity in Ultraprecision Machining / Z.J. Yuan, M. Zhou, S. Dong // J. of Mat. Proc. Technol. – 1996. – Vol. 62. – P.327–330. 6. *Vandersande J.W.* Low temperature thermal conductivity of natural type II diamond / J.W. Vandersande // Diamond Res. – 1974. – P. 21–24. 7. *Burgemeister E.A.* Thermal conductivity of natural diamond between 320°K and 450°K / E.A. Burgemeister // Physics B. – 1978. – № 2. – P. 165–179. 8. *Карслоу Г.* Теплопроводность твердых тел / Г. Карслоу, Д. Егер/ – М.: Наука, 1964. – 487 с. 9. *Васильев Л.А.* Алмазы, их свойства и применение / Л.А. Васильев, З.П.Белых. – М.: Недра, 1983. – 101 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Karban' V.I. Anizotropija obrabatyvaemosti monokristallov / V.I. Karban', V.V. Rogov, A.I. Karban' i dr. // Sverhtverdye materialy. – 1981. – № 2. – S. 14–17. 2. Nesmelov A.F. Almaznye instrumenty v promyshlennosti / Nesmelov A.F. – M.: Mashinostroenie, 1964. – 343 s. 3. Novikov N.V. Trewinostojkost' monokristallov almaza / N.V. Novikov, S.N. Dub, V.I. Mal'cev // Sverhtverdye materialy. – 1992. – № 5. – S. 6–11. 4. Hurt H.H. Tribological Considerations of the Diamond Single-Point Tool / H.H. Hurt, D.L. Decker // Proc. of the SPIE. – 1984. – Vol. 508. – P.126–131. 5. Yuan Z.J. Effect of Diamond Tool Sharpness on Minimum Cutting Thickness and Surface Integrity in Ultraprecision Machining / Z.J. Yuan, M. Zhou, S. Dong // J. of Mat. Proc. Technol. – 1996. – Vol. 62. – P.327–330. 6. Vandersande J.W. Low temperature thermal conductivity of natural type II diamond / J.W. Vandersande // Diamond Res. – 1974. – R. 21–24. 7. Burgemeister E.A. Thermal conductivity of natural diamond between 320oK and 450oK / E.A. Burgemeister // Physics B. – 1978. – № 2. – R. 165–179. 8. Karslou G. Teploprovodnost' tverdyh tel / G. Karslou, D. Eger/ – M.: Nauka, 1964. – 487 s. 9. Vasil'ev L.A. Almazy, ih svojstva i primenenie / L.A. Vasil'ev, Z.P.Belyh. – M.: Nedra, 1983. – 101 s.

**В. І. ЛАВРІНЕНКО**, д-р техн. наук,  
**О. О. ПАСІЧНИЙ**, канд. техн. наук, Київ, Україна,  
**В. Ю. СОЛОД**, канд. техн. наук, Дніпродзержинськ, Україна

## **ЗАСТОСУВАННЯ ПОДРІБЛЕНИХ ІНСТРУМЕНТАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ ТА МІНЕРАЛЬНИХ КОНЦЕНТРАТІВ У ВИГЛЯДІ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ НАПОВНЮВАЧІВ У РОБОЧОМУ ШАРІ КРУГІВ З НТМ**

У статті пропонується, для підвищення ефективності шліфування, частину зерен НТМ замінити функціональним наповнювачем, основною функцією якого повинно бути таке структурування абразивного робочого шару, яке функціонально буде аналогічно створенню інструменту з дискретним ріжучим шаром. Представлено деякі показники обробки таким інструментом.

В статье предлагается, для повышения эффективности шлифования, часть зерен СТМ заменить функциональным наполнителем, основной функцией которого является такое структурирование рабочего слоя, которое функционально будет аналогично созданию инструмента с дискретным режущим слоем. Представлены некоторые показатели обработки таким инструментом.

*V. I. LAVRINENKO, O. O. PASICHNIJ, V. JU. SOLOD*

*APPLICATION CRUSHED TOOL MATERIALS AND MINERAL CONCENTRATES IN THE FORM OF FUNCTIONAL LOADINGS IN A WORKING LAYER OF CIRCLES FROM SUPERFIRM MATERIALS*

In article it is offered, for increase of efficiency of grinding, a part of grains SHM to replace with the functional filler which basic function is such structurization of a working layer which will be functional similarly to creation of the tool with a discrete cutting layer. Some indicators of processing are presented by such tool.

Свого часу було виявлено, в тому числі і одним з авторів даної статті [1], що відносна концентрація алмазів у робочому шарі круга у 100%, яка є найбільш характерною для кругів з надтвердих матеріалів, є у значній частині процесів шліфування перебільшеною і більш ефективною є концентрація у 75%, а навіть, як свідчать роботи А.І.Грабченка і В.О.Федоровича – 50% і навіть менше [2]. Це помітили і закордонні дослідники, тому в імпортних кругах здебільшого концентрація складає саме 75% [3]. Разом з тим виникає певна проблема, оскільки зменшення концентрації призводить до збільшення площі зв'язки, яка контактує зі шламом, а і навіть із оброблюваним матеріалом і, як наслідок, слабкою ділянкою на робочій поверхні круга стає зв'язуюче. Відтак, виникає необхідність його чимось зміцнювати або втримувати від підвищеного зношування. Здебільшого посилення цієї слабкої ланки відбувається за рахунок модифікування чи зміни зв'язуючого, що

призводить до невиправданого розширення номенклатури зв'язуючих, зростання дефіцитності їх специфічних складових, значної втрати універсальності зв'язуючих і, як наслідок, збільшення витрат на виробництво шліфувальних кругів з НТМ. На наш погляд, ідеологія вирішення цієї проблеми повинна бути дещо іншою. Треба змінювати не склад зв'язуючого, а застосовувати більш-менш універсальне зв'язуюче і, при цьому, частину зерен НТМ замінювати на функціональні наповнювачі, основною функцією яких і повинно бути посилення отієї слабкої ланки робочого шару круга. Це фактично є розробка абразивного інструменту з дискретним ріжучим шаром, у якому знаходяться ріжучі зерна та функціональні тверді включення у вигляді подріблених інструментальних матеріалів. Безумовно, для останніх необхідно для різних умов обробки визначити їх функцію – зносостійкість, тепловідведення, зменшення коефіцієнту тертя, тощо.

У цьому напрямку є певні напрацювання, які знайшли своє відображення в літературі. Так, авторами [4] з метою підвищення продуктивності та якості обробки в структуру шліфувального круга нарівні із абразивними зернами та керамічною зв'язкою вносяться електрокорундові сферичні частинки. При цьому, величина таких частинок дорівнювала 0,45...0,65 від величини абразивних зерен, а їх кількість складала 0,50...0,54 від кількості самих абразивних зерен. Іншим варіантом такого рішення є пропозиція авторів [5], коли абразивний інструмент має корпус, на якому розташовані вставки з абразивом різної зернистості, що спираються на корпус через еластичні елементи різної жорсткості. З метою підвищення точності та якості обробки, а також збільшення зносостійкості інструменту на еластичних вставках з меншою жорсткістю розташовані вставки, які містять абразив з більшою зернистістю і навпаки. Авторами [6] уточнюється такий функціональний елемент. В їх рішенні шліфувальний круг має робочу частину, яка містить зерна алмазу або кубічного нітриду бору і зв'язуюче, у склад якого входять фенольна смола та наповнювач, а також опорний елемент з пористого склоподібного матеріалу у формі диску, на який встановлюють робочу частину круга. Матеріал вказаного елемента містить зерна білого плавленого глінозему та склоподібне зв'язуюче. Теплопровідність і коефіцієнт теплового розширення введеного елемента забезпечують розмірну стабільність шліфувального круга незалежно від кількості тепла, що виділяється в процесі шліфування. Вкажемо, що характеристики тертя за цих умов мають суттєве значення, оскільки існує небезпека схоплення зв'язуючого з оброблюваним матеріалом, а це може призвести до викиду частинок зв'язуючого, підвищення коефіцієнта тертя, зростання температури в зоні контакту та наступному руйнуванню. На подолання тертя витрачається значна частина енергії в процесі обробки. Наприклад, при обробці пластмас різанням на тертя припадає до 60% від всього тепловиділення. Існує, і є найбільш розповсюдженою, можливість зниження тертя за

рахунок модифікації або просочення зв'язок. Так, в склад зв'язуючих вводять наповнювачі, що сприяють зниженню тертя (чавун, графіт, дисульфід молибдену, фтористий кальцій, тощо) або імпрегнатори з великою адгезійною здатністю та термодинамічною місткістю (олія рослинна, сірка, сульфат натрію, стеарин, тощо). Разом з тим, таке модифікування або просочування потребує зміни технологічного регламенту на виготовлення алмазного та кубонітового інструменту, є специфічним для певних умов обробки і не завжди спрацьовує позитивно. Тому, в рамках даної роботи нами розглядався саме викладений вище інший підхід – не модифікація зв'язуючого, а часткова заміна (до 50%) алмазів або кубоніту на функціональні елементи з подріблених інструментальних матеріалів різної зернистості від 160/125 до 1000/800, а дослідження особливостей застосування таких елементів і було *метою* даної роботи.

Вкажемо, що абразивний інструмент з НТМ здебільшого обмежується лише двома найбільш твердими штучними матеріалами: синтетичними алмазами та кубічним нітридом бора. Між тим, у багатьох випадках в конструкціях шліфувальних кругів, які є характерними для кругів з НТМ, виникає необхідність у використанні досить твердих абразивних матеріалів, але значно меншої вартості і інших фізико-механічних показників. Вкажемо, що до таких матеріалів можливо віднести групу тугоплавких надтвердих матеріалів, які уявляють собою алмазоподібні матеріали у вигляді кристалів з локалізованими еквівалентними зв'язками [7], а також подріблені полікристалічні надтверді матеріали – гексаніт та киборит. Відомостей в літературі по застосуванню Гексаніта-А є достатньо і відомо, що він має певну область застосування. При цьому, шліфувальні круги виготовлялися виключно з Гексаніту-А, а ось дані по одночасному застосуванню в робочому шарі подріблених зерен та зерен шліфпорошків НТМ у літературі відсутні. А між тим, було би доречним застосувати такі подріблені інструментальні матеріали саме у вигляді функціональних наповнювачів.

Досліджень з використання вказаних матеріалів у конструкціях шліфувальних кругів з НТМ майже не проводиться, а також невідомі дослідження по вихідним даним цих абразивних матеріалів. Тому на першому етапі нас цікавило якраз отримання таких вихідних даних для інструментальних керамік – оксидної ВО13 (система  $Al_2O_3$ ), оксидно-карбідної ВОК71 і ВОК60 (система  $Al_2O_3+TiC$ ) та нітридної Силініт (система  $Si_3N_4$ ). Абразивний матеріал (рисунок 1) отримували в результаті подріблення спечених різальних пластин з інструментальних керамік, що вже були у використанні, до необхідної зернистості. Остання технологія досить відома, наприклад, для отримання Гексаніту-А. Додатково вкажемо, що зацікавленість у таких дослідженнях також ще полягає у тому, що шлам кераміки є досить

активним абразивним матеріалом, який значно зношує зв'язку алмазних кругів, якими ця кераміка піддається обробці. Тому, виявлення принципових особливостей дії такого абразивного впливу може допомогти у пошуку шляхів підвищення зносостійкості кругів. Порівняння працездатності різних ІАНТМ в шліфувальних кругах провадили при обробці зразків з полімерної зв'язки Б8 та сірого чавуну (рисунок 2).

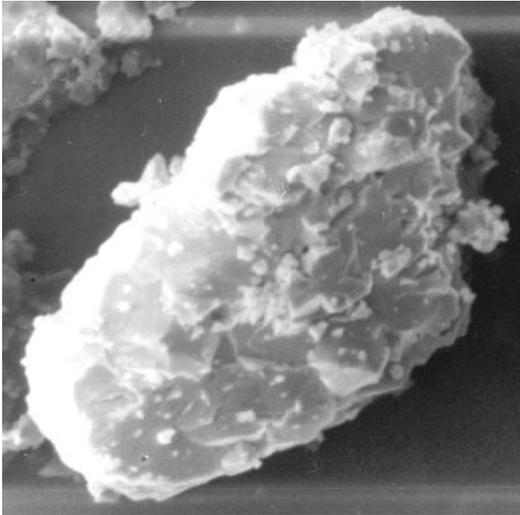


Рисунок 1 – Приклад абразивного зерна з подрібленої кераміки VO13

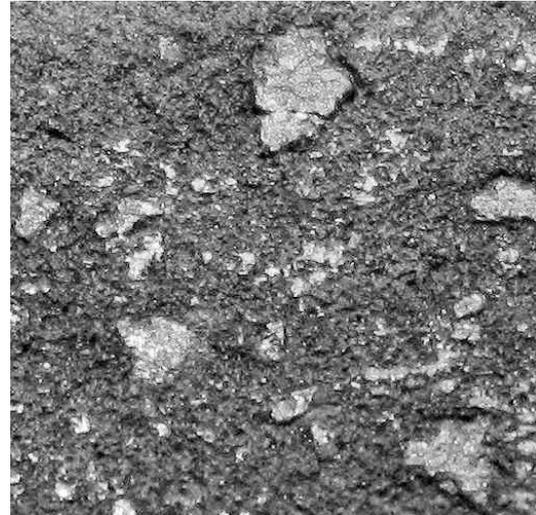


Рисунок 2 – Стан поверхні кругу з наявністю зерен  $\text{Si}_3\text{N}_4$  з площинками тертя

Виявлено, що із підвищенням твердості інструментальних абразивних матеріалів та НТМ при обробці як чавуну, так і полімерного матеріалу, знос кругу зростає. Тим самим, можливо зробити висновок, що для обох цих матеріалів не є необхідним провадити обробку кругами з НТМ. Для цього більш ефективними будуть круги з абразивним матеріалом у вигляді подрібленої ріжучої кераміки, наприклад, оксидної. Крім того, з аналізу рис. 2 та стану ріжучої поверхні кругів з різних абразивних матеріалів можливо зробити ще один важливий висновок. Пов'язаний він з тим, що для алмазних та кубонітових кругів характерною є їх розвинена робоча поверхня із виступаючими зернами, а ось для кругів з подрібленою керамікою характерною є наявність на робочій поверхні великої кількості зерен із чітко вираженими площинками тертя (рисунок 3). Як наслідок, з цього випливає також висновок про те, що такі подріблені керамічні матеріали можуть бути використані як функціональні і бути заміниками певної частини алмазів або кубоніту у вигляді матеріалів, що будуть захищати зв'язку від зношування, а навіть і бути певними антифрикційними елементами в зоні контакту зв'язки з оброблюваним матеріалом. Тим самим, у нас є два основних напрямки застосування подріблених інструментальних матеріалів: перший у вигляді опорних антифрикційних та антизношувальних елементів і другий у вигляді активних абразивних та також антизношувальних елементів.

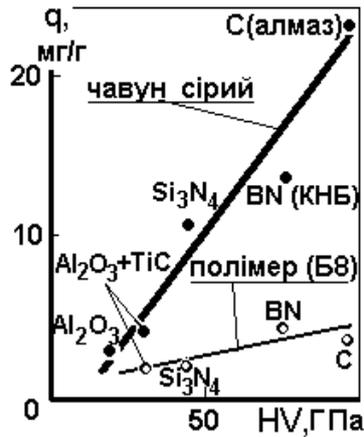


Рисунок 3 – Залежності, що відбивають вплив твердості абразивних матеріалів на показник зносостійкості кругів з ними при шліфуванні сірого чавуну та полімерної зв'язки Б8

До першого напрямку слід віднести вказані вище подріблені кераміки та компакти з мікропорошків КНБ [8]. Компакти мікропорошків КНБ розроблені в Інституті надтвердих матеріалів ім. В.М.Бакуля НАН України. Вони мають специфічну шарувату будову (рисунок 4), що дозволяє їм пошарово зношуватися в процесі алмазно-абразивної обробки і значно (до 2-х раз) зменшувати витрати високовартісних надтвердих матеріалів. Приклад стану ріжучої поверхні круга з опорними компактами поданий на рисунку 5. Звернемо увагу на те, що з подріблених керамік найбільш зносостійкими є кераміки на основі  $Al_2O_3$ . Між тим, в Україні є природня мінеральна сировина у вигляді мінеральних зернистих концентратів, у т.ч. із вмістом  $Al_2O_3$ , яка може розглядатися у вигляді опорних елементів. До такої мінеральної сировини, що потенційно мають абразивні властивості, віносяться титано-цирконові мінерали та кварць – продукти переробки титано-цирконової руди на Вольногорском горно-металургійному комбінаті Дніпропетровської області України.

Нашими дослідженнями [9] виявлено, що у якості опорних елементів у робочому шарі круга можуть бути ефективно застосовані такі зернисті мінеральні концентрати українського виробництва – рутилові. Встановлено, що застосування їх у вигляді часткової (25%) заміни алмазів дозволяє підвищити зносостійкість алмазних кругів та отримати незвичний мікропрофіль обробленої поверхні, який неможливо досягти стандартними алмазними кругами. Окрім того, домішка цих природних зернистих порошоків в зв'язку алмазно-абразивних кругів, дозволяє, по-перше, отримати значну (до 25 %) економію надтвердих матеріалів (алмазів та кубоніту), по-друге, знижується вартість цих кругів, що суттєво впливає на техніко-економічні

показники механічної обробки і, по-третє, підвищується якість оброблюваних поверхонь.

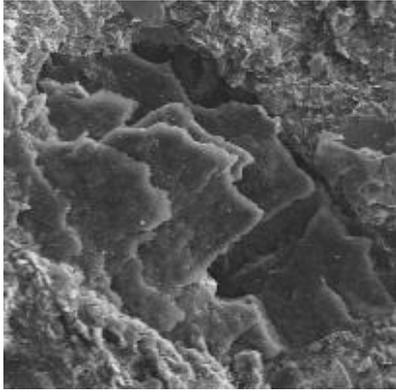


Рисунок 4 – Вигляд компакту на зламі робочого шару круга

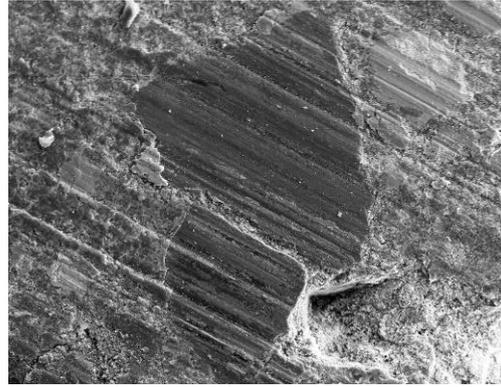


Рисунок 5 – Вигляд стану робочої поверхні круга із опорними антифрикційними компактами

До другого напрямку слід віднести подріблений киборит. Киборит це композиційний матеріал з неперервним каркасом кубічного нітриду бора, характеризується високою твердістю, термостійкістю та механічною міцністю. В Інституті надтвердих матеріалів ім. В.М.Бакуля НАН України, на основі систем  $cBN-Al$  та  $cBN-TiC-Al$ , розроблено и виготовляються високоякісні надтверді полікристалічні матеріали киборит (киборит-1, -2, -3).

На теперішній час з кибориту виготовляють високоефективний лезовий інструмент. Перспективність застосування подрібненого кибориту для виготовлення шліфувального інструменту обумовлюється широким використанням для обробки шліфуванням виробів із сталі з покриттям (наплавками), які містять  $C$ ,  $Cr$ ,  $Ti$ ,  $B$ ,  $Ni$ ,  $W$ ,  $V$  та інші елементи. Шліфувальний інструмент на основі гексаниту-А не показує достатньо високої ефективності при обробки таких матеріалів, та, крім того, характеризується досить несталими показниками обробки.

Одним з важливих факторів, який впливає на працездатність шліфувального інструмента, є інтенсивність видалення із зони обробки продуктів шліфування. Цей вимозі добре задовольняють інструменти із структурованою (перервною) структурою робочого шару. Тому перспективним виглядає застосування подрібненого кибориту не лише як абразивного, а і як структуруючого елементу в шліфувальному інструменту з НТМ.

Для попередніх дослідів у цьому напрямку було виготовлено абразивні шліфувальні круги 12А2-45 з використанням подрібненого кибориту на органічній зв'язці В2-08 (рисунок 6).

Результаті обробки без охолодження таким інструментом сталі Р6М5, з продуктивністю до  $500 \text{ мм}^3/\text{хв.}$ , показав, що обробка не викликає появи дефектів на поверхні та має задовільну для інструментального виробництва шорсткість, яка мало різниться для кожного з інструментів (рисунок 7).

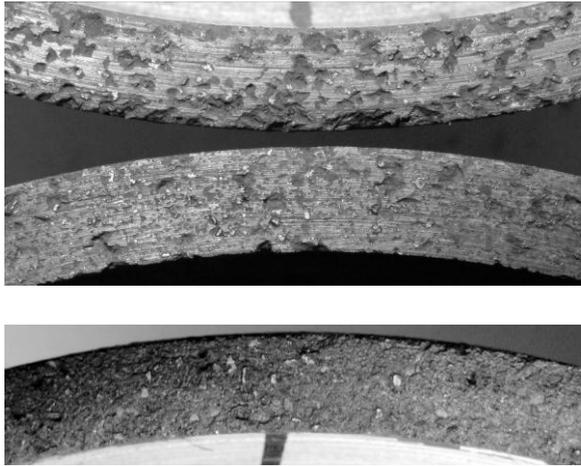


Рисунок 6 – Фрагменти робочої поверхні бразивних кругів: а – з подрібненого кибориту K500/400; б – суміші подрібненого кибориту K500/400 та алмазів АС6 125/100, по 50%; в – суміші подрібненого кибориту K500/400 та кубоніту KB 125/100, по 50%.

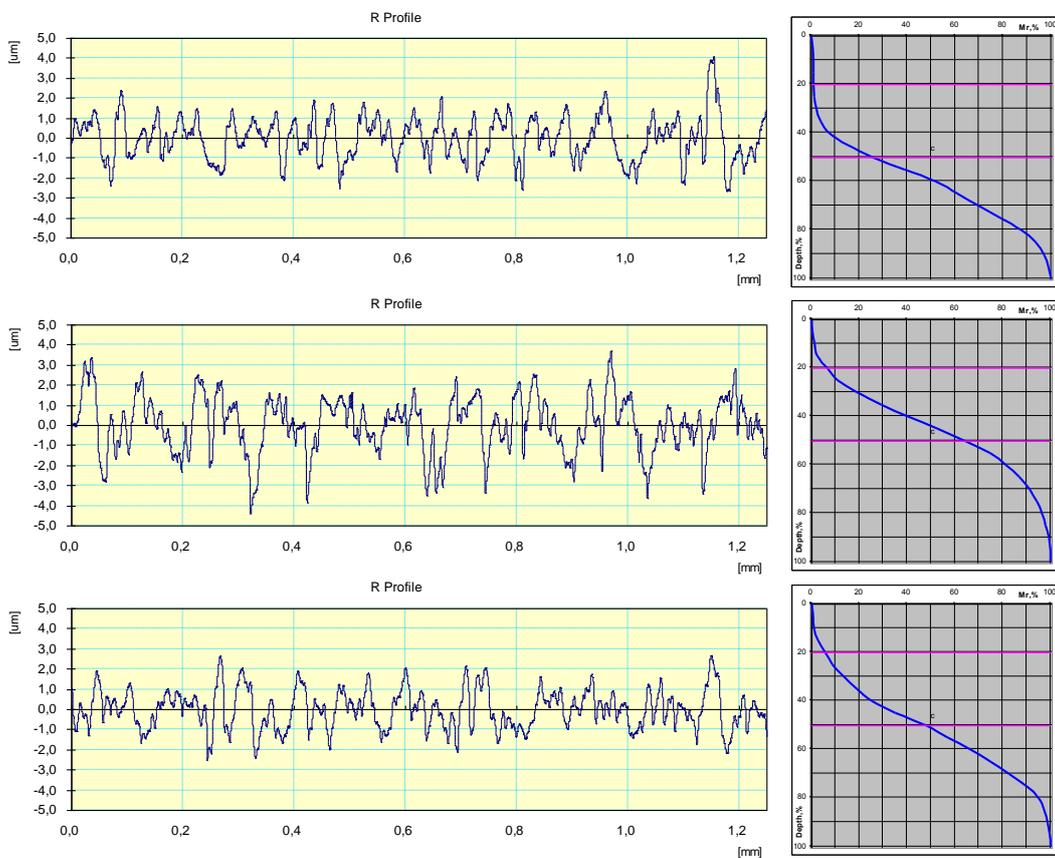


Рисунок 7 – Шорсткість та опорна крива поверхні обробленої киборитовим інструментом при продуктивності  $500 \text{ мм}^3/\text{хв}$ : а) — з подрібненого кибориту K500/400; б) — суміші подрібненого кибориту K500/400 та алмазів АС6 125/100, по 50%; в) — суміші подрібненого кибориту K500/400 та кубоніту KB 125/100, по 50%.

Витрати інструменту найбільші були у випадку, якщо він був виготовлений тільки з подрібненого кубоніту — 12 мг/г (при продуктивності  $500 \text{ мм}^3/\text{хв}$ ), значно менший для суміші кибориту та кубоніту — 7 мг/г, та найменший для суміші кибориту та алмазу — 6 мг/г.

Також досить сталою була різниця, при обробки кожним з кругів, по такому показнику, як відносна опорна крива профілю обробленої поверхні (див. рисунок 7). Для інструменту виготовленого тільки з подрібленого кибориту — відносна довжина заповненого профілю на рівні 50% була 20–30%, для інструменту із суміші кибориту та кубоніту — 40–50%, а для суміші кибориту та алмазу — 60–70%.

У подальшій роботі ми плануємо виготовити та дослідити показники роботи інструменту з подрібленого кибориту та його суміші з кубонітом та алмазами на металевій зв'язці, що дозволить більш повно розкрити високі фізичні властивості киборита, як функціонального матеріалу у абразивному інструменті.

**Список використаних джерел:** 1. *Лавриненко В.И.*, Угол направления действия касательных напряжений – ключ к инструменту из СТМ // Сверхтвердые материалы. – 2002. – № 2. – С. 71–76. 2. 3D моделирование процессов алмазно-абразивной обработки : Монография / *А.И.Грибченко, В.А.Федорович.* – Харьков: НТУ «ХПИ», 2008. – 376 с. 3. *Шепелев А.А., Лавриненко В.И.* Выбор характеристики кругов для шлифования инструментальных материалов: Рекомендации. – К.: ИСМ АН УССР, 1989. – 11 с. 4. А.с. № 1073082 (СССР). Шлифовальный круг / Московский станкоинструментальный институт и Институт высоких температур АН СССР: *И.П.Третьяков, В.Н.Тимофеев, Б.П.Кудряшов, В.Т.Ивашильников.* – Оpubл. в Б.И., 1984, № 6. 5. А.с. № 1077771 (СССР). Абразивный инструмент / Воронежский политехнический институт: *В.Н.Старов, Г.С.Фролов, Л.А.Федотова, Ю.А.Дубовых.* – Оpubл. в Б.И., 1984, № 9. 6. Пат. № 4385907 (США). Шлифовальный круг с опорным элементом из теплоизоляционного материала / Toyota Koki Kabushiki Kaisha: *T. Tomita, I. Suzuki, T. Imai, M. Kitajima.* – Оpubл. 31.05.83. 7. Синтетические сверхтвердые материалы. В 3-х т. Т.1. Синтез сверхтвердых материалов /Редкол.: Новиков Н.В. (отв. ред.) и др. - Киев: Наук. думка, 1986. - 280 с. 8. К вопросу об использовании компактов металлизированных порошков кубонита в виде наполнителей в рабочем слое алмазных кругов / *В.И.Лавриненко, Б.В.Сытник, И.В.Лещук и др.*// Инженерия поверхности и реновация изделий : Материалы 9-й международной науч.-техн. конф. 25–29 мая, 2009 г., г. Ялта. – К.: АТМ Украины, 2009. – С. 94–99.

**Bibliography (transliterated):** 1. Lavrinenko V.I., Ugol napravlenija dejstvija kasa-tel'nyh naprjazhenij – ključ k instrumentu iz STM // Sverhtverdye materialy. – 2002. – № 2. – S. 71–76. 2. 3D modelirovanie processovalmazno-abrazivnoj obrabotki : Monografija / *A.I.Gribchenko, V.A.Fedorovich.* – Har'kov: NTU «HPI», 2008. – 376 s. 3. Shepelev A.A., Lavrinenko V.I. Vybhor harakteristiki krugov dlja shlifovanija inst-rumental'nyh materialov: Rekomendacii. – K.: ISM AN USSR, 1989. – 11 s. 4. A.s. № 1073082 (SSSR). Shlifoval'nyj krug / Moskovskij stankoinstrumental'nyj insti-tut i Institut vysokih temperatur AN SSSR: *I.P.Tret'jakov, V.N.Timofeev, B.P.Kudrjashov, V.T.Ivashinnikov.* – Opubl. v B.I., 1984, № 6. 5. A.s. № 1077771 (SSSR). Abrazivnij instrument / Voronezhskij politehnicheskij in-stitut: *V.N.Starov, G.S.Frolov, L.A.Fedotova, Ju.A.Dubovyh.* – Opubl. v B.I., 1984, № 9. 6. Pat. № 4385907 (SShA). Shlifoval'nyj krug z opornim elementom z teploizoljacionogo materi-alu / Toyota Koki Kabushiki Kaisa: *T. Tomita, I. Suzuki, T. Imai, M. Kitajima.* – Opubl. 31.05.83. 7. Sinteticheskie sverhtverdye materialy. V 3-h t. T.1. Sintez sverhtverdyh materialov /Redkol.: Novikov N.V. (otv. red.) i dr. - Kiev: Nauk. dumka, 1986. - 280 s. 8. K voprosu ob ispol'zo-vanii kompaktovmetalizirovannyh poroshkov kubonita v vide napolnitelej v rabochem sloealmaznyh krugov / *V.I.Lavrinenko, B.V.Sytnik, I.V.Lewuk i dr.*// Inzhenerija po-verhnosti i renovacija izdelij : Materialy 9-j mezh-dunarodnoj nauch.-tehn. konf. 25–29 maja, 2009 g., g. Jalta. – K.: АТМ Ukrainy, 2009. – S. 94–99.

УДК: 621.941

**С. Л. ЛЕОНОВ**, д-р техн. наук, **В. Д. ГОНЧАРОВ**, канд. техн. наук,  
**Е. Б. БЕЛОВ**, **А. Б. БЕЛОВ**, Барнаул, Россия

## **ПРОГНОЗИРОВАНИЕ АВТОКОЛЕБАНИЙ ПРИ ТОЧЕНИИ**

Наведено математичну модель для прогнозування сталих автоколебаний при токарній обробці металів. Модель дозволяє визначати амплітуду й частоту коливань, викликаних координатним зв'язком і нелінійністю сили різання.

Приведена математическая модель для прогнозирования установившихся автоколебаний при токарной обработке металлов. Модель позволяет определять амплитуду и частоту колебаний, вызываемых координатной связью и нелинейностью силы резания.

*S. L. LEONOV, V. D. GONCHAROV, E. B. BELOV, A. B. BELOV*

### *FORECASTING OF SELF-OSCILLATIONS AT TURNING*

The mathematical model for forecasting the established self-oscillations is resulted at turning processing metals. The model allows to define amplitude and frequency of the fluctuations caused by coordinate communication and nonlinearity of force of cutting.

Повышение требований к геометрическим параметрам качества обработанных поверхностей приводит к необходимости прогнозировать наличие и величину колебательных явлений при механической обработке. В настоящее время установлено [1], что при резании металлов наблюдаются два вида колебаний: вынужденные колебания, вызываемые периодически действующими внешними силами, и автоколебания, которые не зависят от действия внешних сил. Причины появления вынужденных колебаний наиболее ясны и потому сравнительно легко устранимы. Появление автоколебаний не связано с какой-либо внешней периодической силой, они являются самовозбуждающимися колебаниями. В связи с этим необходимо уделить большое внимание изучению и умению управлять автоколебаниями, умению прогнозировать их появление еще на этапе проектирования технологических процессов механической обработки деталей. Умение управлять автоколебаниями в процессе обработки резанием является актуальной задачей при обеспечении заданной точности и производительности, а также при создании экономически оправданных технологических процессов обработки деталей.

Основными источниками возникновения автоколебаний при точении являются координатная связь и падающая нелинейная зависимость силы от скорости резания [1]. Координатная связь проявляется в том, что в общем случае под действием приложенной силы вершина резца стремится сместиться не только в направлении вектора силы, но и в ортогональном направлении. Это происходит из-за того, что жесткость инструментального узла различна по разным направлениям, т.е. существуют главные оси же-

сткости (оси  $V_1$  и  $V_2$ ), которые обычно не совпадают с координатными осями станка. На рисунке 1 приведена расчетная схема для математического описания колебательной системы.

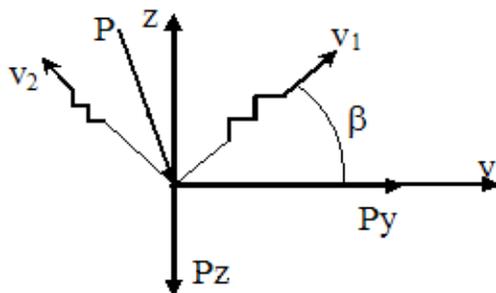


Рисунок 1 – Расчетная схема для описания колебаний

Рассмотрим одномассовую систему, в которой происходят колебания только одного элемента - токарного резца – вдоль главных осей  $V_1$  и  $V_2$ . Тогда уравнение движения представляет собой систему двух нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{V}_1 + G_1 \dot{V}_1 + C_1 V_1 = Py(V_\phi; t_\phi) \cdot \cos \beta - Pz(V_\phi; t_\phi) \cdot \sin \beta = P_1(V_\phi; t_\phi); \\ m_2 \ddot{V}_2 + G_2 \dot{V}_2 + C_2 V_2 = -Py(V_\phi; t_\phi) \cdot \sin \beta - Pz(V_\phi; t_\phi) \cdot \cos \beta = P_2(V_\phi; t_\phi) \end{cases} \quad (1)$$

где:  $m_1; m_2, G_1, G_2, C_1, C_2$  – соответственно, приведенные массы резца, коэффициенты демпфирования и жесткости по осям  $V_1; V_2; V_\phi$  – фактическая скорость резания;  $t_\phi$  – фактическая глубина резания.

Ранее проведенными исследованиями были получены формулы для расчета тангенциальной и нормальной составляющих силы резания  $Pz$  и  $Py$ . Аналитическое выражение для расчета составляющей  $Pz$ , полученное аппроксимацией экспериментальных данных методом наименьших квадратов, для стали 40X [3] имеет вид:

$$Pz = Kt \cdot K_0 \cdot \left( \frac{a \cdot V \cdot k_1 + b \cdot k_2}{V^2 + f \cdot V \cdot k_5 + g \cdot k_6} + \frac{c \cdot k_3}{V} + d \cdot k_4 \right) \quad (2)$$

$$K_0 = (1.099 - 0.00166 \cdot \varphi) \quad K_t = 0.307 \cdot t^{0.852}$$

$$\begin{cases} a = 1998.6 \cdot S^{-0.172} \\ b = -43092 \cdot S^{-0.5179} \\ c = 2601.3 \cdot S^{0.8343} \\ d = 596.87 \cdot S^{0.9812} \\ f = -33.5 \cdot S^{-0.95} \\ g = 354 \cdot S^{-1.98} \end{cases} \quad \begin{cases} k_1 = 1.0756 \cdot e^{-0.00729 \cdot \gamma} \\ k_2 = 0.937 \cdot e^{0.00649 \cdot \gamma} \\ k_3 = 1.7054 \cdot e^{-0.0534 \cdot \gamma} \\ k_4 = 1.066 \cdot e^{-0.00639 \cdot \gamma} \\ k_5 = 0.583 \cdot e^{0.054 \cdot \gamma} \\ k_6 = 0.3816 \cdot e^{0.09634 \cdot \gamma} \end{cases}$$

Аналогичное выражение получено и для составляющей  $P_y$ .

Выражения (1) и (2) позволяет описать устойчивость системы на различных участках зависимости силы от скорости резания (Рис. 2). В частности при решении уравнения (1) можно сделать вывод, что технологическая система резец – деталь может терять устойчивость на падающем участке, т.е. появляются автоколебания.

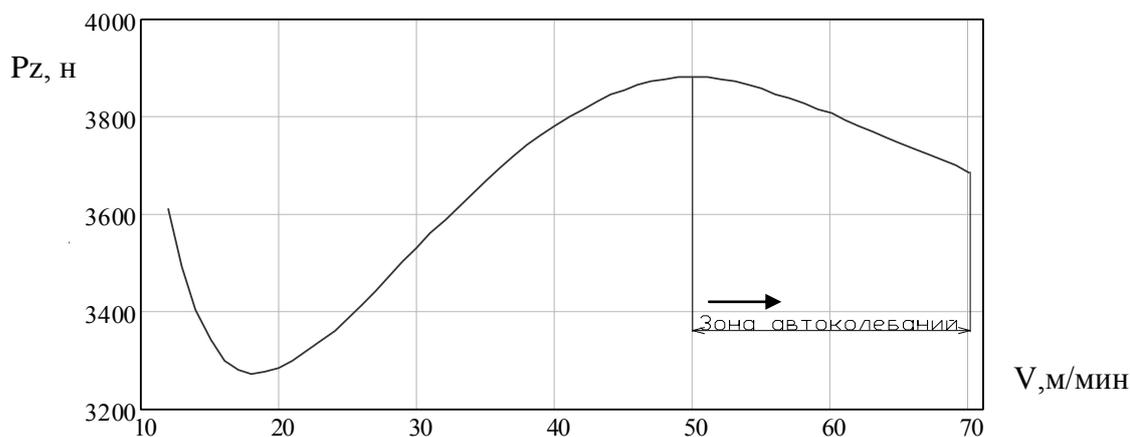


Рисунок 2 – Изменение составляющей силы резания  $P_z$  в зависимости от скорости резания  $V$ , при обработке стали 40X,  $t=4$ мм,  $S=0.49$  мм/об

Для расчета автоколебаний необходимо численными методами решать дифференциальное уравнение (1) при силе, полученной по формуле (2). Начальные условия для уравнения (1) можно выбирать произвольно, но для получения установившихся автоколебаний необходимо задаваться достаточно большим временем, что значительно увеличивает продолжительность расчета. Особенно это важно при колебаниях на границе устойчивости, когда колебания устанавливаются медленно. На рис. 3 приведен пример расчета фазового портрета при расчете установившегося движения. Время расчета переходного процесса (решение дифференциальных уравнений) на современной вычислительной технике составляет десятки минут. При этом реальное время обработки, за которое колебания устанавливаются, обычно не превышает 1 с.

Известно, что дифференциальные уравнения второго порядка обладают фильтрующими свойствами и даже при нелинейности силы резания колебания описываются законом, близким к моногармоническому по каждой из осей. Это подтверждается также и примерами расчетов (рис. 3). Учитывая это, нами разработан алгоритм получения первой гармоники установившихся колебаний, который основывается на методе гармонической линеаризации и позволяет исключить из расчетов переходный процесс, а, следовательно, значительно сократить время решения.

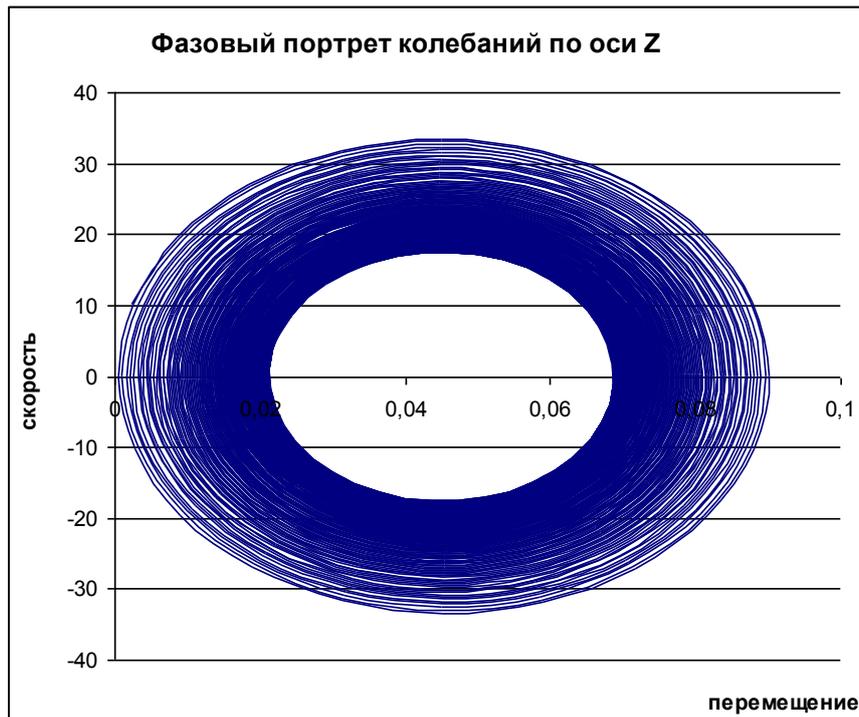


Рисунок 3 – Фазовый портрет колебаний при скорости резания  $V = 100$  м/мин

Полагаем колебания по соответствующим осям моногармоническими с различными частотами:

$$\begin{aligned}
 V_1 &= A_1 \sin \omega_1 \tau + V_{10}; & V_2 &= A_2 \sin(\omega_2 \tau + \varphi) + V_{20}; \\
 \dot{V}_1 &= A_1 \omega_1 \cos \omega_1 \tau; & \dot{V}_2 &= A_2 \omega_2 \sin(\omega_2 \tau + \varphi); \\
 \ddot{V}_1 &= A_1 \omega_1^2 \sin \omega_1 \tau; & \ddot{V}_2 &= A_2 \omega_2^2 \sin(\omega_2 \tau + \varphi),
 \end{aligned} \tag{3}$$

где  $A_i$ ,  $\omega_i$ ,  $\varphi$  – соответственно, амплитуды, частоты и фаза колебания по осям  $V_1$  и  $V_2$ ;  $V_{10}$ ,  $V_{20}$  – средние значения упругих отжатий (постоянная составляющая).

Колебания по осям  $z$  и  $y$  рассчитываются по формулам (см. рис. 1):

$$\begin{aligned}
 z &= V_2 \cos \beta + V_1 \sin \beta; & V_\phi &= V_0 + \dot{z} \\
 \dot{z} &= \dot{V}_2 \cos \beta + \dot{V}_1 \sin \beta; & t_\phi &= t_0 - y. \\
 y &= V_1 \cos \beta + V_2 \sin \beta;
 \end{aligned}$$

где  $V_\phi$  и  $t_\phi$  – фактические значения скорости и глубины резания с учетом колебаний.

Для поиска параметров колебаний  $\omega_i$ ,  $A_i$ ,  $V_{i0}$  и  $\varphi$  можно использовать метод наименьших квадратов. Задав произвольными значениями параметров, рассчитываем значения правой и левой частей уравнений (1). Затем в соответствии с методом наименьших квадратов подбираем значения  $\omega_i$ ,  $A_i$ ,  $V_{i0}$  и  $\varphi$ , обеспечивая приближенное выполнение равенств. При этом, критерием минимизации является выражение:

$$S = \sum_{\tau=0}^{\tau_k} [m_1 \ddot{V}_1 + G_1 \dot{V}_1 + C_1 V - P_1(V_\phi; t_\phi)]^2 + \sum_{\tau=0}^{\tau_k} [m_2 \ddot{V}_2 + G_2 \dot{V}_2 + C_2 V_2 - P_2(V_\phi; t_\phi)]^2 \quad (4)$$

Проблема поиска параметров колебаний с помощью метода наименьших квадратов заключается в том, что тривиальным минимумом критерия (4) являются значения  $A_i = 0$ . Именно к этому решению сходится поиск решения по умолчанию. Однако, это решение при наличии автоколебаний является неустойчивым: малейшие колебания параметров выводят систему из равновесия, вызывая переходной процесс, приведенный на рис. 3.

Для исключения тривиального неустойчивого решения можно использовать метод гармонической линеаризации. Составляющие силы резания также разлагаем в ряд Фурье с сохранением только первых гармоник:

$$P_z(V_0 + \dot{z}) = a_0 + a_1 \sin \omega \tau + b_1 \cos \omega \tau \quad (5)$$

где  $a_0, a_1, b_1$  – коэффициенты разложения (гармонической линеаризации).

Аналогичная формула используется и для составляющей силы резания  $P_y$ . Коэффициенты разложения в формуле (5) зависят от амплитуд, фаз и частот колебаний из выражений (3). Подставим разложения (3) и (5) в уравнения (1); затем потребуем совпадения амплитуд синусных и косинусных составляющих в этих уравнениях. Эти выражения и позволяют численным методом найти значения параметров установившихся колебаний.

В настоящее время описанный подход полностью реализован для решения одностепенной задачи расчета колебаний вдоль оси  $Z$ . Программа реализована на языке VBA в среде табличного процессора Excel с использованием надстройки "Поиск решения". Время расчета установившихся колебаний на современной вычислительной технике не превышает нескольких секунд. Время получения этого решения из дифференциальных уравнений (1) может достигать десятков минут. Экспериментальная проверка показала адекватность модель реальному процессу течения.

В настоящее время проводится модернизация алгоритма для решения многомассовой задачи с колебаниями по различным осям.

**Список использованных источников:** 1. *Леонов С.Л.* Основы создания имитационных технологий прецизионного формообразования/ Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2006.-198 с. 2. *Кудинов В.А.* Динамика станков. – М.: Машиностроение, 1967. – 359 с. 3. *Белов Е.Б., Рябцева О.П., Леонов С.Л.* Прогнозирование автоколебаний при тчении металлов/ «4-я Всероссийская научно-техническая конференция» Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул 2010.

**Bibliography (transliterated):** 1. Leonov S.L. Osnovy sozdaniya imitacionnyh tehnologij precizionnogo formoobrazovanija/ Alt. gos. tehn. un-t im. I.I. Polzunova. – Barnaul: Izd-vo AltGTU, 2006.-198 s. 2. Kudinov V.A. Dinamika stankov. – M.: Mashinostroenie, 1967. – 359 s. 3. Belov E.B., Rjabceva O.P., Leonov S.L. Prognozirovanie avtokolebanij pri tochenii metallov/ «4-ja Vserossijskaja nauchno-tehnicheskaja konferencija» Alt. gos. tehn. un-t im. I.I. Polzunova. – Barnaul 2010.

*А.С. МАНОХИН*, канд. техн. наук,  
*С.А. КЛИМЕНКО*, д-р техн. наук, Киев, Украина

## **МЕХАНИКА КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НА ПЕРЕДНЕЙ ПОВЕРХНОСТИ КОСОУГОЛЬНОГО ОДНОКРОМОЧНОГО ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ИНСТРУМЕНТА С ОБРАБАТЫВАЕМЫМ МАТЕРИАЛОМ**

Наведено результати аналітичного дослідження параметрів механіки контактної взаємодії на передній поверхні косокутного однокрайкового різця з робочою частиною з полікристалічного надтвердого матеріалу на основі кубічного нітриду бору при точінні деталей з загартованої сталі. Показана зміна сил різання, усадки стружки, ступеню пластичної деформації в залежності від умов процесу різання.

Представлены результаты аналитического исследования параметров механики контактного взаимодействия на передней поверхности косоугольного однокромочного резца с рабочей частью из поликристаллического сверхтвердого материала на основе кубического нитрида бора при точении деталей из закаленной стали. Показано изменение сил резания, усадки стружки, степени пластической деформации в зависимости от условий процесса резания.

*A.S. MANOHIN, S.A. KLIMENKO*  
*MECHANICS OF CONTACT INTERACTION ON THE FORWARD SURFACE OBLIQUE-ANGLED HALF-ROUND THE TOOL WITH PKNB*

The results of analytic research of parameters of mechanics of contact interaction on the rake face of one-edged oblique cutting tool equipped with polycrystalline CBN inserts in turning of hardened steel have been discussed. The changes in cutting forces, chip shrinkage and strain were shown in dependence on cutting condition.

*Введение.* Параметры, характеризующие механику контактного взаимодействия инструмента со стружкой – одни из важнейших показателей процесса резания. Для задач оптимизации и эффективного управления технологическими процессами необходимо оценить эти показатели в зависимости от условий обработки – режимов резания, вида обрабатываемого материала, геометрических параметров инструмента.

Применительно к обработке деталей из закаленных сталей экспериментальные исследования в этом направлении выполнены ранее для традиционных режущих инструментов, оснащенных керамикой [1]. Учитывая перспективность применения для высокопроизводительной обработки деталей, особенно длинномерных, из закаленных сталей, такие исследования представляют значительный интерес для процесса точения косоугольным однокромочным инструментом, оснащенный поликристаллическим сверхтвердым материалом (ПСТМ) на основе кубического нитрида бора (КНБ) [2].

Представления о величинах силы резания, усадки, напряжений в зоне стружкообразования особенно важны для такого “чувствительного” к условиям обработки метода как косоугольное резание однокромочным инструментом, так как при обработке закаленных сталей с большими сечениями среза явления на передней поверхности инструмента могут обуславливать снижение работоспособности инструмента и качества обработанной поверхности, особенно при недостаточной жесткости системы СПИД, что характерно для обработки длинномерных деталей.

В настоящей работе выполнено теоретическое и экспериментальное исследование параметров механики контактного взаимодействия на передней поверхности инструмента.

*Результаты исследований и их обсуждение.* Величина главной составляющей силы резания на передней поверхности инструмента вычисляется по известным значениям угла сдвига или усадки стружки на основании уравнения баланса механической энергии при резании

$$P_{zp} \cdot v = A_{pd} + A_{tp}, \quad (1)$$

где  $P_{zp}$  – тангенциальная составляющая силы резания, действующая на передней поверхности инструмента;  $A_{pd}$  – работа пластической деформации в единицу времени на поверхности сдвига;  $A_{tp}$  – работа силы трения на передней поверхности инструмента.

В работе [3] предложено уравнение, для определения удельной работы пластической деформации при резании:  $A_w = \varepsilon \cdot \tau$ . Согласно условию пластичности Мизеса-Губера количество удельной энергии формоизменения не зависит от схемы деформации, а является функцией механических свойств материала. В этой связи можно утверждать, что в условиях косоугольного резания, когда деформация материала в плоскости сдвига происходит в двух направлениях – в плоскости нормальной к режущей кромке и касательном к ней направлении, данное уравнение также справедливо.

Работа пластической деформации за единицу времени:

$$A_{pd} = \tau(\varepsilon) \cdot \varepsilon \cdot a \cdot b \cdot v, \quad (2)$$

где  $\tau(\varepsilon)$  – предел прочности обрабатываемого материала на сдвиг, являющийся функцией степени и скорости деформации;  $\varepsilon$  – суммарный относительный сдвиг, определяемый [4] суммой относительных сдвигов при перемещении металла перпендикулярно к режущей кромке инструмента и вдоль нее:



где  $K_{LN} = \frac{\cos \beta_N}{\sin \beta_N}$ ;  $\eta$  – угол схода стружки по передней поверхности;  $\beta_N$  – угол сдвига в плоскости перпендикулярной к режущей кромке.

Угол схода стружки для инструментов с различными углами наклона режущей кромки определялся по следам на передней поверхности инструмента.

Направление сдвига в плоскости сдвига по отношению к перпендикуляру к режущей кромке может быть определено углом  $\rho$ :

$$\operatorname{tg} \rho = \frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_N} \quad (4)$$

Работу, производимую за счет трения стружки о переднюю поверхность резца определим из выражения:

$$A_{\text{тр}} = \frac{3}{4} \cdot l_c \cdot b_c \cdot q_f \cdot v_c \quad (5)$$

где  $q_f$  – удельная сила трения;  $l_c$  – длина контакта стружки с передней поверхностью;  $b_c$  – ширина стружки,  $b_c = b \cdot \cos \eta$ ;  $v_c$  – скорость схода стружки по передней поверхности  $v_c = \frac{v \cos \alpha}{K_{LN} \cos \beta_N}$

Подставляя выражения (2) и (5) в (1), получим уравнение для определения составляющей силы резания  $P_z$  при заданной величине  $\beta_N$ :



Неизвестную величину длины контакта стружки с передней поверхностью можно определить из условия равенства моментов сил, действующих на передней поверхности резца и в плоскости сдвига. Полагаем, что нормальные напряжения в плоскости сдвига распределены равномерно, а точка приложения нормальной составляющей сил, действующих на передней поверхности, соответствует координате центра тяжести эпюры нормальных контактных давлений. Для нормальных напряжений, действующих на передней поверхности инструмента, получаем эпюру  $P_n \cdot x = P_n \cdot \left( \frac{l_c - x}{l_c} \right)$ . При единичных величинах  $l_c$  и  $p_m$ ,  $n = 4$  и  $x_c = 0,167l_c$

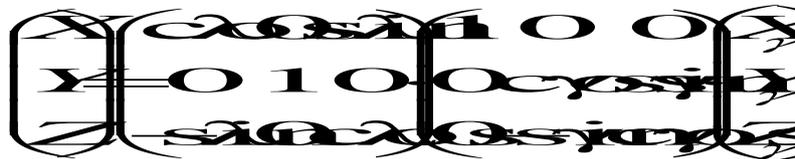
координата центра тяжести находится как  $x_c = \frac{\int_0^{l_c} x \cdot p_n(x) dx}{\int_0^{l_c} p_n(x) dx}$ . Тогда длина кон-

такта:

$$l_c = \frac{1}{2} \frac{N_p}{N_t} \frac{N_t}{N_p} \quad (7)$$

где  $N_t$ ,  $N_p$  – силы, нормальные к поверхности сдвига и передней поверхности инструмента соответственно.

Соотношения между составляющими силы, действующей на передней поверхности инструмента заданными в системах координат  $OXYZ$  и  $OX_\gamma Y_\gamma Z_\gamma$  (рис. 1) можно найти, осуществляя последовательные преобразования систем координат:



Векторная сумма сил, действующих на переднюю поверхность инструмента со стороны обрабатываемого материала равна:  $\vec{R} = \vec{P}_x + \vec{P}_y + \vec{P}_z$ . Подставляя составляющие вектора  $\vec{R}$  в матрицу преобразования координат и раскрыв ее с учетом знаков  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$  получим:

$$\begin{pmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \alpha \sin \beta & \sin \alpha \sin \beta & \cos \beta \\ 0 & \cos \alpha \cos \beta & \sin \alpha \cos \beta \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_x \cos \alpha \sin \beta + P_y \sin \alpha \sin \beta + P_z \sin \alpha \\ P_x \sin \alpha \cos \beta + P_y \cos \alpha \cos \beta + P_z \cos \alpha \\ P_x \sin \alpha + P_y \cos \alpha \end{pmatrix}$$

Откуда, с учетом известной величины  $P_z$ :

$$N_t = \frac{P_x \cos \alpha \sin \beta + P_y \sin \alpha \sin \beta + P_z \sin \alpha}{\cos \alpha \sin \beta}$$

Составляющая силы сдвига, действующая вдоль режущей кромки

$$P_t = \frac{P_x \sin \alpha + P_y \cos \alpha + P_z \sin \alpha \cos \beta}{\sin \alpha}$$

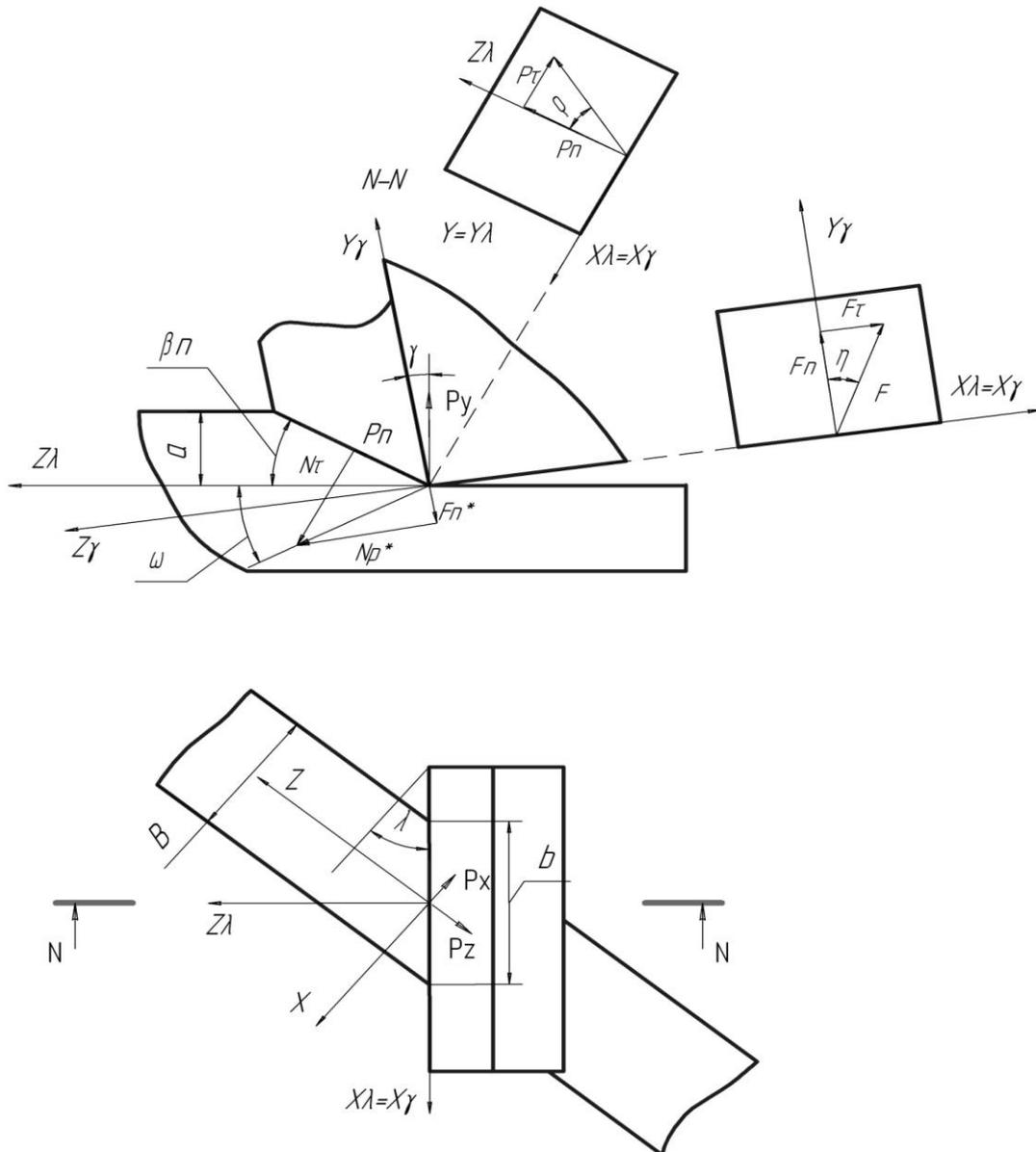


Рисунок 1 – Схема сил, действующих на передней поверхности резца при косо-угольном резании

Из условия статического равновесия элемента стружки следует, что  $F_t = |P_t|$ . При условии справедливости допущения о совпадении направления силы трения на передней поверхности с направлением перемещения элементов сходящей стружки [4–6], величина проекции силы трения на нормальную к режущей кромке плоскость определяется соотношением  $F_N = F_t / \tan \eta$

Сила  $N_t$ , действующая в направлении перпендикулярном к плоскости сдвига, определяется следующим образом:

$$\omega = \mu - \gamma; \frac{\sqrt{F_t^2 + F_N^2}}{N_p^*}; N_p^* = -N_p; N_t = P_t \tan \alpha \beta N_p$$

$$\mu = \arctg$$

Для расчета сил резания необходимо определить угол сдвига в плоскости  $N-N$ . Воспользуемся расчетной схемой представленной на рис. 2. Для начального значения температуры определяется угол сдвига  $\beta_N$ , величина которого связана со средней удельной силой трения  $q_f$  на передней поверхности, рассчитанной при заданной на данном этапе итерационного цикла температуре. Для полученного значения угла  $\beta_N$  снова определяется температура и соответствующая величина  $q_f$ .

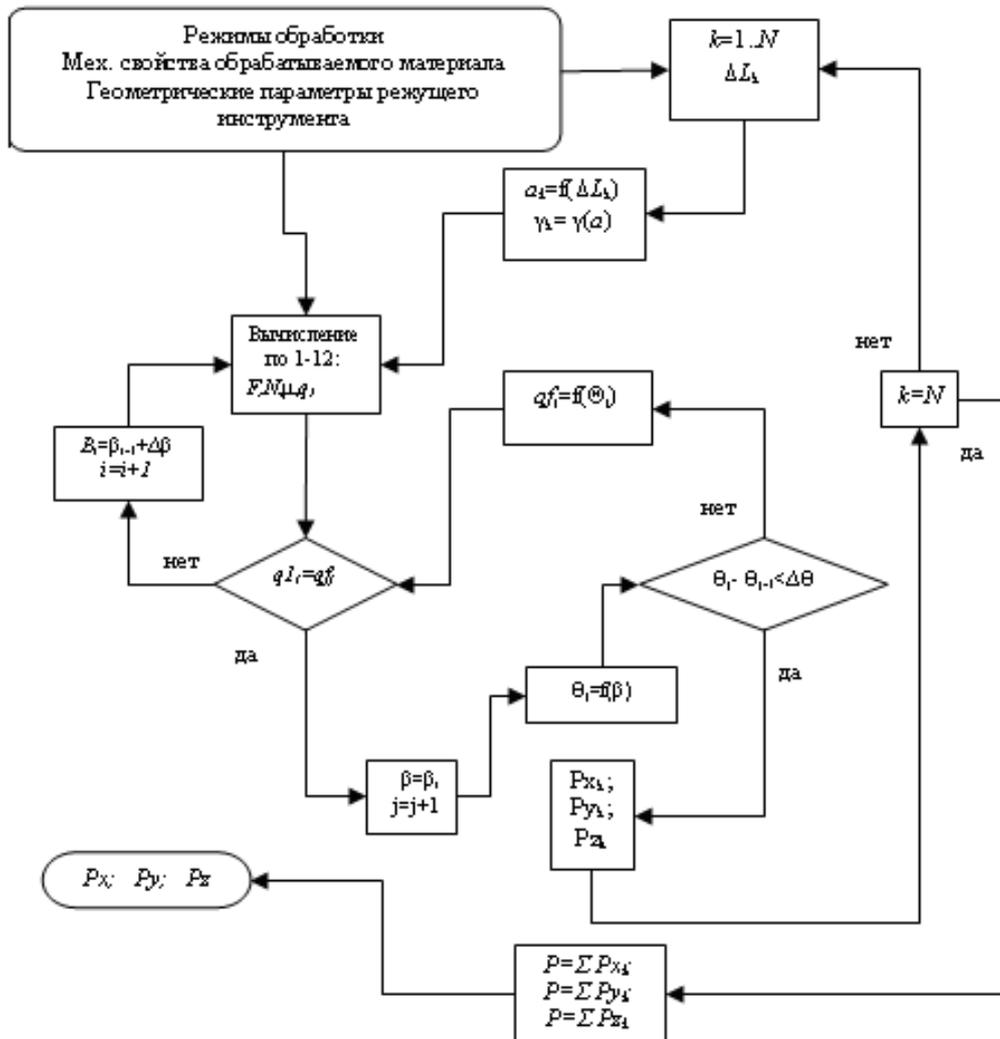


Рисунок 2 – Алгоритм расчета сил резания

Расчетный цикл продолжается до тех пор, пока решение не стабилизируется (т.е. разница температур, определенных на  $j$  и  $j-1$  итерационных ходах, составляет менее 1 %). Температура резания при расчетах определялась по методике [7]. Такой порядок расчета осуществляется для каждого элементарного участка  $\Delta L_k$  режущей кромки резца, что необходимо для учета переменной вдоль режущей кромки толщины среза. На последнем этапе элементарные силы резания суммируются.

Непосредственное влияние на точность решения задачи, связанной с определением температурно-силовых параметров процесса косоугольного резания оказывает учет влияния на механические свойства обрабатываемого материала степени и скорости деформации, а также температуры в зоне сдвига и контактных зонах на поверхностях инструмента.

В работе [8] предложено использовать для вычисления  $\tau_\phi$  понятия температуры, модифицированной по скорости деформации, что позволяет рассчитать напряжения при разных сочетаниях  $\dot{\varepsilon}$  и  $\theta_d$  на основании анализа зависимости  $\tau - \theta_d$ , построенной при  $\dot{\varepsilon}$  и  $\theta_d = const$ . Для описания зависимости предела текучести материала от условий обработки В.С. Кушнером [9], пренебрегая влиянием скорости деформации, получена зависимость  $\tau_\phi = \frac{B\varepsilon^{c+1}}{15c+1}$ . Авторы [8, 9] указывают, что уже при  $\varepsilon = 1$  в материале наступает предельное упрочнение, после чего, при дальнейшем увеличении степени деформации, роста предела прочности на сдвиг не наблюдается.

Данное положение не нашло экспериментального подтверждения в работе [3], где показано, что касательные напряжения в зоне сдвига определяются выражением:

$$\tau_\phi = \frac{B\varepsilon^{c+1}}{15c+1} \quad (8)$$

где  $B$  и  $c$  – константы;  $\varepsilon$  – относительная деформация.

Авторы указывают, что признаков предельного упрочнения сталей в процессе резания не наблюдается даже при очень высоких степенях относительной деформации. На основании установленного совпадения кривых удельных работ при резании и сжатии с равными степенями деформации доказано также отсутствие существенного влияния температуры и скорости деформации на напряжения в зоне сдвига. Учитывая хорошее соответствие экспериментальных данных выражению (8), в дальнейшем оно использовалось в настоящей работе.

В работах [9–11] показано, что средняя удельная сила трения  $q_f$  при резании металлов является инвариантом, и для широкого спектра условий резания изменяется незначительно. При этом величина  $q_f$  определяется свойствами обрабатываемого материала:  $q_f = 0,6S_B$ , где  $S_B$  – истинное напряжение обрабатываемого материала в момент образования шейки.

Для косоугольного точения однокромочным инструментом закаленных сталей характерным является большие значения сил, действующих на задней поверхности резца, что связано с длиной активной части режущей

кромки. Приближенно их величину можно определить в соответствии с известными зависимостями (9–12) [8]:

$$P_{yz} = N_z = q_{NZ} \cdot L \cdot \delta, \quad P_{zz} = F_z = q_{FZ} \cdot L \cdot \delta, \quad P_{xz} = 0 \quad (9)$$

$$q_{NZ} = S_b; \quad q_{FZ} = 0,38 S_b \quad (10)$$

$$L = X_3 - X_1 \quad (11)$$



The diagram shows a cutting tool with a cutting edge. A coordinate system is established with the x-axis along the cutting direction and the z-axis perpendicular to it. The cutting force vector  $F_z$  is shown acting along the z-axis. The normal force vector  $N_z$  is shown acting along the x-axis. The contact length  $L$  is indicated between points  $X_1$  and  $X_3$ . The contact width is  $\delta$ . The diagram is labeled (12).

где  $q_{NZ}$ ,  $q_{FZ}$  – нормальная и касательная средние удельные силы резания на задней поверхности инструмента;  $L$  – длина активной части режущей кромки;  $\delta$  – суммарная длина площадки контакта на задней поверхности резца;  $\rho$  – радиус округления режущей кромки;  $\gamma_k = 60^\circ$  – критическое значение переднего угла;  $\alpha_k$  – кинематический задний угол, определенный в направлении вектора скорости резания;  $h_3$  – величина фаски износа на задней поверхности резца.

В качестве примера проведем расчет технологических составляющих силы резания, действующих на передней и задней поверхностях резца при обработке стали ШХ15, закаленной до 60–61 HRC. При расчетах примем истинный предел прочности данного материала в соответствии с [8]  $S_B = 2200$  МПа. Обработка производилась инструментом, оснащенным режущей пластиной SNMN 120308 из ПСТМ на основе КНБ «киборит».

Как показывает расчет, уровень сил, действующих на задней поверхности инструмента, при косоугольном точении значительно выше в сравнении с силовой нагрузкой на передней поверхности резца, что связано с малой толщиной среза. Такое соотношение нагрузок в целом является характерным для чистового точения закаленных сталей инструментом, оснащенным ПСТМ на основе КНБ, на передней поверхности которых выполнена упрочняющая фаска. В связи со значительной величиной радиальной составляющей силы на задней поверхности отношение  $P_y$  к  $P_z$  находится, как правило, в диапазоне 1,1–2,1, увеличиваясь по мере изнашивания инструмента [8]. Отличием обработки косоугольным однокромочным инструментом является значительно более высокие соотношения между составляющими силы резания на передней и задней поверхностях инструмента и, как следствие, между силами  $P_y$  и  $P_z$ . Оценить величину составляющих и соотношение между ними можно пользуясь расчетными данными, описывающими зависимость составляющих сил резания на передней поверхностях от условий обработки (рис. 3).

Данные расчетов показывают, что с увеличением угла  $\lambda$  от  $20^\circ$  до  $60^\circ$ , составляющие  $P_y$  и  $P_z$  на передней поверхности уменьшаются в 1,25 и

1,6 раза, а составляющая  $P_x$  при  $\lambda = 60^\circ$  превосходит по величине силу  $P_z$ . В тоже время, на задней поверхности в диапазоне  $\lambda = (40-60)^\circ$  наблюдается рост сил. Особенно интенсивно увеличивается радиальная составляющая, что связано с уменьшением кинематического заднего угла (от  $8,7^\circ$  при  $\lambda = 30^\circ$  до  $6^\circ$  при  $\lambda = 60^\circ$ ), вызывающее увеличение длины контактной площадки на задней поверхности инструмента. Увеличивается также кинематический радиус округления режущей кромки инструмента определяемый в главной секущей плоскости, и как следствие, растет толщина подминаемого режущей кромкой слоя материала, степень деформации которого при этом увеличивается, что приводит к росту нормальных контактных нагрузок на задней поверхности резца. Как видим, даже для острозаточенного инструмента, при косоугольном однокромочном точении характерным является большая величина радиальной составляющей силы резания по отношению с тангенциальной во всем диапазоне применяемых углов наклона. Максимальной величины (1,9) данное соотношение достигает при  $\lambda = 60^\circ$ .

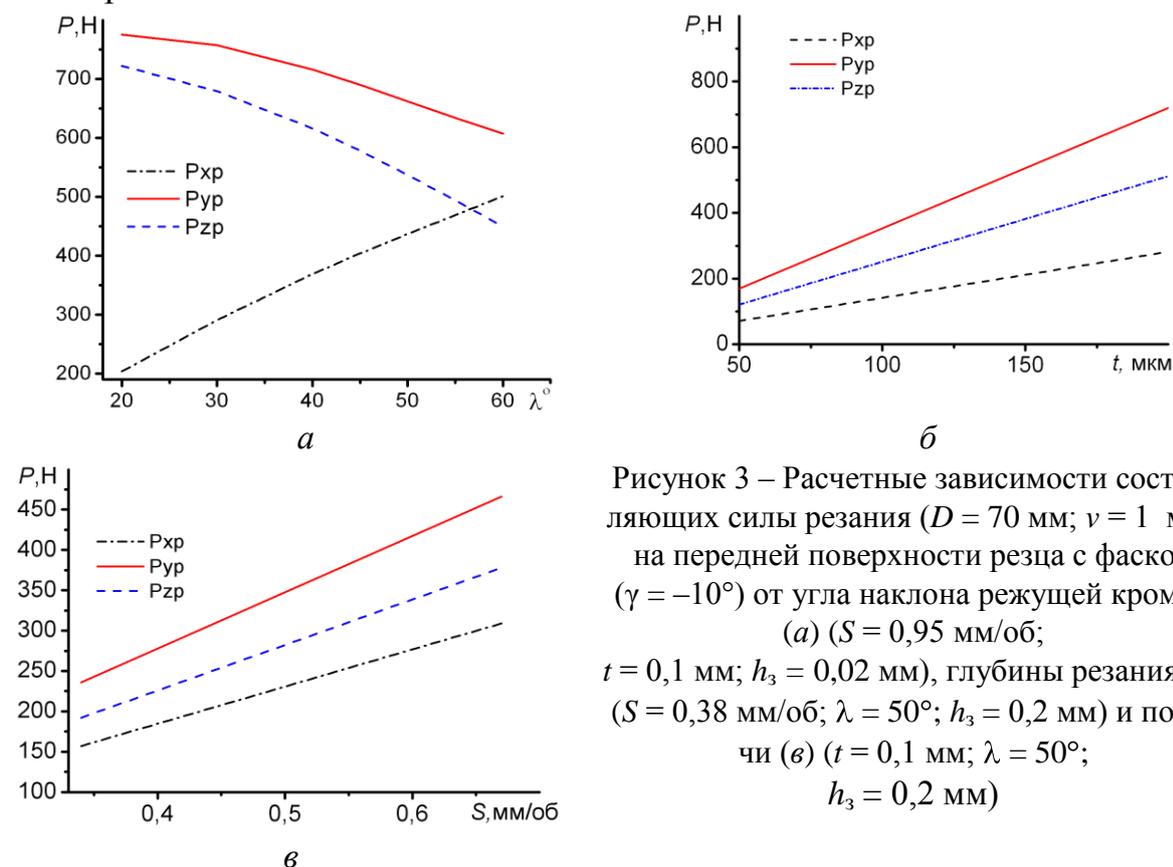


Рисунок 3 – Расчетные зависимости составляющих силы резания ( $D = 70$  мм;  $v = 1$  м/с) на передней поверхности резца с фаской ( $\gamma = -10^\circ$ ) от угла наклона режущей кромки (а) ( $S = 0,95$  мм/об;  $t = 0,1$  мм;  $h_3 = 0,02$  мм), глубины резания (б) ( $S = 0,38$  мм/об;  $\lambda = 50^\circ$ ;  $h_3 = 0,2$  мм) и подачи (в) ( $t = 0,1$  мм;  $\lambda = 50^\circ$ ;  $h_3 = 0,2$  мм)

Приращение площади контакта инструмента с обрабатываемым материалом при увеличении  $t$  и  $S$  приводит к прямопропорциональному росту всех составляющих силы резания. Глубина резания влияет на силы резания более интенсивно, чем подача, в связи с большим влиянием данного пара-

метра на длину активной части режущей кромки. Следовательно, более выгодным является увеличение подачи, что при одинаковой объемной производительности обеспечит меньшую величину сил резания.

Для острозаточенного инструмента при большой подаче ( $S = 0,95$  мм/об), когда толщина среза велика, составляющие силы резания на передней поверхности инструмента больше в сравнении с силами, действующими на задней его грани. Однако уже при ширине фаски износа  $h_3 = 0,2$  мм соотношение между составляющими сил на задней и передней поверхностях инструмента достигает больших значений. При  $h_3 = 0,2$  мм соотношения между радиальными составляющими  $P_{yz}/P_y$  находятся в диапазоне от 4 до 9 раз, а тангенциальная составляющая на задней поверхности больше, чем на передней в 1,2–2,5 раза. Чем меньше подача и глубина резания, а значит и площадь сечения срезаемого слоя, тем выше данные соотношения.

Величина отношений  $P_y$  к  $P_z$ , определяющего направление вектора результирующей силы резания в плоскости, совпадающей с вектором главной скорости резания и перпендикулярной направлению подачи, составляет при указанных режимах 2,6–4,0 раза, что также значительно выше, чем при обычном твердом точении.

Разработанная модель позволяет оценить влияние угла наклона режущей кромки инструмента на степень пластической деформации обрабатываемого материала. Рост угла  $\lambda$  вызывает уменьшение относительного сдвига в нормальном направлении  $\varepsilon_N$ , что связано с отклонением направления схода стружки от нормали к режущей кромке, уменьшение нормальной составляющей силы трения на передней поверхности инструмента, приводящее к увеличению угла действия  $\omega$  и соответствующему росту угла сдвига в плоскости, нормальной к режущей кромке. По мере увеличения угла  $\lambda$ , рост  $\eta$  приводит к более интенсивной деформации материала при его перемещении вдоль режущей кромки и, соответственно, к росту касательной составляющей относительного сдвига  $\varepsilon_T$ . Степень деформации материала, определяемая суммарным относительным сдвигом  $\varepsilon_\Sigma$ , также снижается, хотя и в меньшей степени, чем  $\varepsilon_N$  и усадка стружки в нормальном направлении  $\zeta$ . Расчет (рис. 4) показывает, что для указанных условий с увеличением  $\lambda$  от  $20^\circ$  до  $60^\circ$  величины  $\varepsilon_N$ ,  $\varepsilon_\Sigma$  и  $\zeta$  уменьшаются соответственно в 1,6, 1,4, 2,67, а  $\varepsilon_T$  растет в 1,63 раза. В [4] приводятся сведения о том, что в данном диапазоне изменения угла  $\lambda$  при точении стали твердостью 170 НВ твердосплавным инструментом с  $\gamma = 25^\circ$  степень относительной деформации снижалась от 3,0 до 2,4, т.е. в 1,25 раза. В рассматриваемом случае относительная деформация и степень ее уменьшения выше, что связано с большими отрицательными значениями действительного пе-

реднего угла инструмента. Под действительным (или фактическим [12, 13]) передним углом понимается величина переднего угла, определяемая с учетом соотношения между толщиной срезаемого слоя и радиусом округления режущей кромки.

Необходимо отметить, что в связи с малой толщиной среза, средние значения которой зачастую соизмеримы с радиусом округления режущей кромки резца, при расчете сил на передней поверхности важным является учет действительного (фактического) значения переднего угла режущего

инструмента, определяемого по известной формуле  $\gamma_0 = \arcsin \frac{r \sin \gamma}{\rho}$ .

Изменение толщины среза вдоль режущей кромки резца (рис. 5, а) обуславливает переменную величину переднего угла (рис. 5, б) и, согласно расчетам, определяет изменение нормальных контактных напряжений вдоль режущей кромки на передней поверхности резца (рис. 5, з).

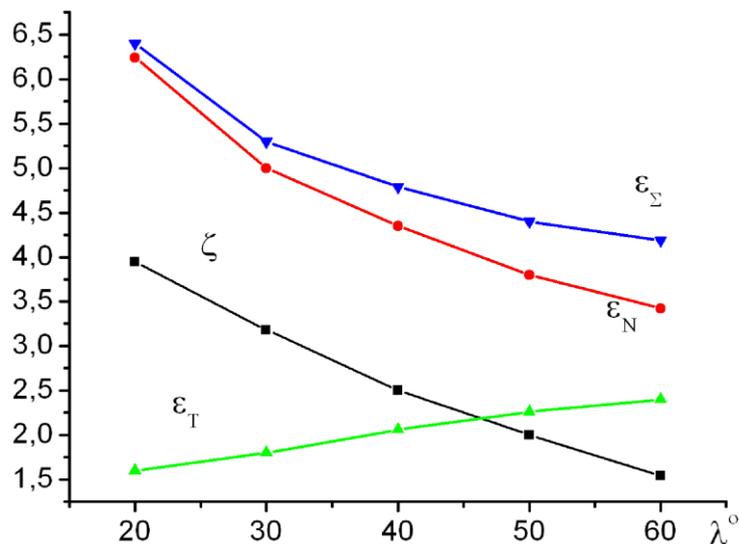


Рисунок 4 – Расчетная зависимость степени пластической деформации обрабатываемого материала от угла наклона режущей кромки ( $S = 0,68$  мм/об;  $t = 0,1$  мм;  $\gamma = -10^\circ$ )

На участках режущей кромки, примыкающих к входной и выходной точкам лезвия, наблюдается резкий рост напряжений, обусловленный большим отрицательным значением действительного переднего угла и краевым эффектом, связанным с ростом напряжений при вдавливании жесткого штампа в упругое полупространство [14]. Степень усадки стружки, определенная в нормальном к режущей кромке сечении, также изменяется вдоль режущей кромки, что свидетельствует о неравномерности деформации вдоль кромки и приводит к относительному перемещению частиц материала, переходящего в стружку.

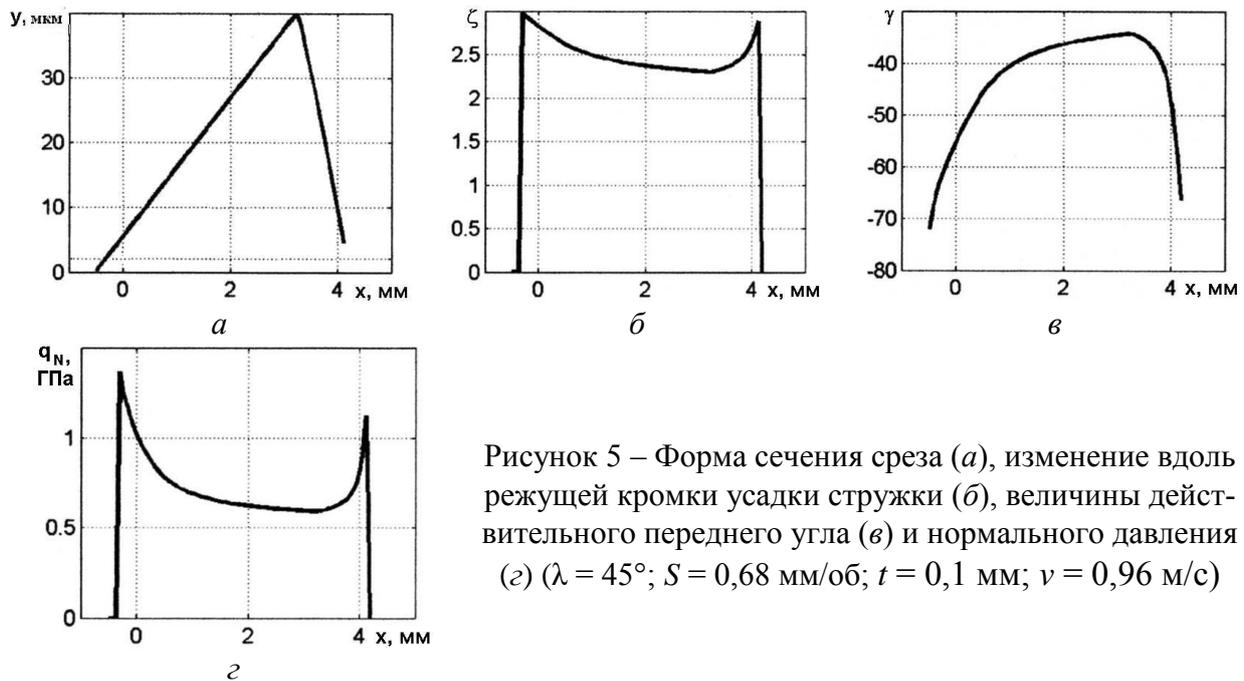


Рисунок 5 – Форма сечения среза (а), изменение вдоль режущей кромки усадки стружки (б), величины действительного переднего угла (в) и нормального давления (г) ( $\lambda = 45^\circ$ ;  $S = 0,68$  мм/об;  $t = 0,1$  мм;  $v = 0,96$  м/с)

**Выводы.** Разработан алгоритм расчета составляющих силы резания на передней поверхности инструмента, учитывающий переменную вдоль режущей кромки толщину сечения среза. Согласно расчетным данным величина составляющих силы резания на передней поверхности составляет  $P_y = 200\text{--}800$  Н;  $P_z = 200\text{--}700$  Н;  $P_x = 100\text{--}500$  Н при  $S = 0,3\text{--}0,95$  мм/об;  $t = 0,05\text{--}0,2$  мм;  $\lambda = (20\text{--}60)^\circ$ .

Переменная величина толщины сечения среза обуславливает изменение вдоль режущей кромки инструмента степени усадки стружки, величин действительного переднего угла и нормального давления.

**Список использованных источников:** 1. Механика и физико-химия контактного взаимодействия при точении закаленной стали керамическими резцами / С.А. Клименко, Ю.А. Мельничук, М.Ю. Копейкина, В.Н. Ткач // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: Зб. наук. праць.– Краматорськ: ДДМА, 2010. – Вип. 26. – С. 8–18.; 2. Klimentko S.A., Manokhin A.S. Hard “Skiving” Turning // J. of Superhard Materials. – 2009. – vol. 31, № 1. – P 42–55. 3. Теоретический расчет шероховатости обработанной поверхности при безвершинном точении / А. В. Остроухов, К. В. Гузий, Б. И. Димитров, Б. А. Перепелица // Резание и инструмент. – 1990. – № 44. – С. 46–48.; 4. Шевченко Н. А., Кунпер Э. Е. Чистовые лезвийные инструменты с большим углом наклона режущих лезвий // Надежность режущего инструмента: Сб. науч. ст. – 1975. – Вып. 2. – С. 222–228.; 5. Pat. US, В 23 В 27/16, В 23 С 25/06. Cutting tool / Hiroshi Shikata. – 1987. – № 4636117, issued 13.01.1987.; 6. Автоколебания токарных резцов. Часть 1. Основные характеристики автоколебаний / Е. Маруи, С. Эмма, С. Като // Tr. ASME. Конструирование. – 1983. – № 2. – С. 105–117.; 7. Армареги И. Дж., Браун Р. Х. Обработка металлов резанием. – М.: Машиностроение, 1977. – 324 с.; 8. Сверхтвердые материалы. Получение и применение: в 6-и т. / Под общей ред. Н. В. Новикова. – К.: ИСМ

им. В. Н. Бакуля, ИПЦ «АЛКОН» НАНУ, 2006.; Т. 5: Обработка материалов лезвийным инструментом / Под ред. С. А. Клименко. – 2006. – 316 с.; **9.** Авток колебания токарных резцов. Часть 2. Механизм подвода энергии / Е. Маруй, С. Эмма, С. Като // Тр. ASME. Конструирование. – 1983. – № 2. – С. 117–128.; **10.** Васин С. А. Прогнозирование виброустойчивости инструмента при точении и фрезеровании. – М.: Машиностроение, 2006. – 384 с.; **11.** Кривоухов В. А., Петруха П. Г. Резание конструкционных материалов, режущие инструменты и станки. – М.: Машиностроение, 1967. – 654 с.; **12.** Кушнер В. С. Термомеханическая теория процесса непрерывного резания пластичных материалов. – Иркутск: Изд-во Ирк. ун-та, 1982. – 180 с.; **13.** Полетика М. Ф. Контактные нагрузки на режущих поверхностях инструмента. – М.: Машиностроение, 1969. – 150 с.; **14.** О структуре поверхностного слоя стали 100Cr6, обработанной лезвийным инструментом из композита-10 / О. А. Розенберг, В. Г. Делеви, С. Е. Шейкин и др. // Сверхтв. материалы. – 1999. – № 5. – С. 57–63.

**Bibliography (transliterated):** 1. Mehanika i fiziko-himija kontaktnogo vzaimodejstviya pri tochenii zakalenoj stali keramicheskimi rezcami / S.A. Klimenko, Ju.A. Mel'nichuk, M.Ju. Kopejkina, V.N. Tkach // Nadijnist' instrumentu ta op-timizacija tehnologichnih sis-tem: Zb. nauk. prac'. – Kramatorsk: DD-MA, 2010. – Vip. 26. – С. 8–18.; 2. Klimenko S.A., Manokhin A.S. Hard “Skiving” Turning // J. of Superhard Materials. – 2009. – vol. 31, № 1. – R 42–55. 3. Teoreticheskij raschet sherohovatosti obrabotanoj poverhnosti pri bezvershinom tochenii / A. V. Ostrouhov, K. V. Guzij, B. I. Dimitrov, B. A. Perepelica // Rezanie i instrument. – 1990. – № 44. – S. 46–48.; 4. Shevchenko N. A., Kipper Je. E. Chistovye lezviynye instrumenty s bol'shim uglom naklona rezhuvih lezviij // Nadezhnost' rezhuwego instrumenta: Sb. nauch. st. – 1975. – Vyp. 2. – S. 222–228.; 5. Pat. US, V 23 V 27/16, V 23 S 25/06. Cutting tool / Hiroshi Shikata. – 1987. – № 4636117, issued 13.01.1987.; 6. Avtokolebanija tokarnyh rezcov. Chast' 1. Osnovnye harakteristiki avtokolebanij / E. Marui, S. Jemma, S. Kato // Tr. ASME. Konstruirovanie. – 1983. – № 2. – S. 105–117.; 7. Armarego I. Dzh., Braun R. H. Obrabotka metallov rezaniem. – М.: Mashinostoenie, 1977. – 324 s.; 8. Sverhtverdye materialy. Po-lu-chenie i primenienie: v 6-i t. / Pod obweij red. N. V. Novikova. – K.: ISM im. V. N. Bakulja, IPC «АЛКОН» НАНУ, 2006.; Т. 5: Об-ра-ботка materialov lezviynym in-strumentom / Pod red. S. A. Klimenko. – 2006. – 316 s.; 9. Avtokolebanija tokarnyh rezcov. Chast' 2. Mehanizm podvoda jenerгии / E. Marui, S. Jemma, S. Kato // Tr. ASME. Konstruirovanie. – 1983. – № 2. – S. 117–128.; 10. Vasin S. A. Prognozirovanie vibroustojchivosti instrumenta pri tochenii i frezerovanii. – М.: Mashinostoenie, 2006. – 384 s.; 11. Krivouhov V. A., Petruha P. G. Rezanie konstrukcionnyh materialov, rezhuvie instrumenty i stanki. – М.: Mashinostoenie, 1967. – 654 s.; 12. Kushner V. S. Termomehanicheskaja teorija processa nepreryvnogo rezanija plastichnyh materialov. – Irkutsk: Izd-vo Irk. un-ta, 1982. – 180 s.; 13. Poletika M. F. Kontaktnye nagruzki na rezhuvih poverhostjah instrumenta. – М.: Mashinostoenie, 1969. – 150 s.; 14. O strukture poverhnostnogo sloja stali 100Cr6, obrabotanoj lezviynym instrumentom iz kompozita-10 / O. A. Rozenberg, V. G. Delevi, S. E. Shejkin i dr. // Sverhtv. materialy. – 1999. – № 5. – S. 57–63.

**В. В. ПЕГЛОВСКИЙ**, канд. техн. наук,  
**В. И. СИДОРКО**, д-р техн. наук,  
**В. Н ЛЯХОВ**, г. Киев, Украина

## **ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ШЛИФОВАНИЯ ПРИРОДНОГО КАМНЯ**

Досліджена і підтверджена при практичному виготовленні виробів з природного каменя можливість призначення раціональних технологічних параметрів шліфування каменя, із застосуванням модернізованих плоскошліфувальних верстатів різних моделей і використання різного алмазно-абразивного інструменту, залежно від приналежності таких каменів до певної групи оброблюваності, з урахуванням їх фізико-механічних властивостей, особливостей хімічного та мінералогічного складу.

Исследована и подтверждена при практическом изготовлении изделий из природного камня возможность назначения рациональных технологических параметров шлифования камня, с применением модернизированных плоскошлифовальных станков разных моделей и использования различного алмазно-абразивного инструмента, в зависимости от принадлежности таких камней к определенной группе обрабатываемости, с учетом их физико-механических свойств, особенностей химического и минералогического состава.

*V. V. PEGLOVSKIJ, V. I. SIDORKO, V. N LJAHOV*

### *TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF GRINDING OF THE NATURAL STONE*

Investigational and confirmed at the practical making of wares from a natural stone possibility of setting of rational technological parameters of polishing of stone, with the use of the modernized polishing machine-tools of different models and use of different diamond and abrasive instrument, depending on belonging of such stone to the certain group of workability, taking into account their physical and mechanical properties, features of chemical and mineralogical composition.

*Введение.* При изготовлении изделий из природного камня имеющих форму тел вращения в камнеобрабатывающем производстве применяются токарные станки разных моделей, модернизированные для обработки твердых, но хрупких материалов, какими являются природные камни [1, 2].

Вместе с тем для обработки плоских поверхностей или поверхностей имеющих канавки, фаски, выборки, геометрическая форма которых определяется формой используемого инструмента при изготовлении строительных, интерьерных, производственно-технических или декоративно-

художественных изделий [3, 4] применяют различные шлифовальные (плоскошлифовальные) станки, модернизированные для обработки камня. При этом параметры обработки (шлифования) природного камня, абразивным алмазным инструментом существенно отличаются от параметров обработки пластичных материалов, например металлов и их сплавов.

Данная работа ставит своей целью разработку технологических параметров шлифования (резания) природных камней с применением плоскошлифовальных станков различных моделей и использованием алмазно-абразивного инструмента.

*Методика исследований.* В соответствии с известной классификацией по обрабатываемости [5] природных декоративных и полудрагоценных камней [6], те их виды, которые используются для изготовления рассматриваемых изделий [3, 4] могут быть условно распределены на пять больших групп, отличающихся своими физико-механическими свойствами [1] химическим составом и минералогическими особенностями. Наиболее распространенные виды камней, которые относятся к разным группам, представлены в табл. 1 [5].

Таблица 1 – Распределение природных камней по обрабатываемости

Группы	Виды камня
1	Все виды мрамора с суммарным содержанием $\text{SiO}_2$ , $\text{Al}_2\text{O}_3$ и $\text{Fe}_2\text{O}_3$ менее 25 %, травертин, туф, известняк, мраморные ониксы всех видов, офиокальцит, флюорит и др.
2	Все виды мрамора с суммарным содержанием $\text{SiO}_2$ , $\text{Al}_2\text{O}_3$ и $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 25-50 %, брекчия, серпентинит, лиственит, лазурит, малахит и др.
3	Все виды лабрадоритов, габбро, беломорит, родонит, нефрит, амазонит, скарн, чароит и др. Суммарное содержание $\text{SiO}_2$ , $\text{Al}_2\text{O}_3$ и $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 50-90 %
4	Граниты всех видов, жадеит, обсидиан, джеспилит гранат-хлоритовые породы, роговики, порфиры и др. Суммарное содержание $\text{SiO}_2$ , $\text{Al}_2\text{O}_3$ и $\text{Fe}_2\text{O}_3$ более 90 %
5	Все виды кварца (морион, цитрин и др.), халцедона (агат, сердолик и др.) и опала (кахолонг), а также кварцит, кремнь, окаменелое дерево, яшма и др. Суммарное содержание $\text{SiO}_2$ , $\text{Al}_2\text{O}_3$ и $\text{Fe}_2\text{O}_3$ более 90 %

В табл. 2 приведены основные технические характеристики некоторых видов плоскошлифовальных станков [7, 8], применяемых для изготовления изделий из камня.

Таблица 2 – Технические характеристики плоскошлифовальных станков

№ п/п	Параметры	3E710A	3E710B-1	3E711B-1
1	Размеры стола, мм	400×125	250×125	400×200
2	Наибольшие размеры заготовок, мм	400×125 ×320	250×125 ×200	400×200 ×400
3	Масса обрабатываемых заготовок, не более, кг	150	50	150
4	Наибольшее расстояние от оси шпинделя до зеркала станка, мм	420	300	445
5	Наибольшее перемещение стола и шпиндельной бабки, мм			
	продольное	490	320	490
	поперечное	170	160	255
	вертикальное	-	200	-
6	Скорость продольного перемещения стола, м/мин.	2-35	2-25	2-35
7	Мощность электродвигателя главного привода, кВт	4	1,5	4
8	Габаритные размеры, мм			
	длина	2560	1310	2380
	ширина	1980	1150	1950
	высота	1790	1550	1915
9	Масса, кг	2300	1000	3380

Модернизация таких станков при обработке камня сводится к установке системы регенерации и очистки смазывающе-охлаждающей технологической среды (СОТС), в качестве которой выступает вода или 3-5 % раствор кальцинированной соды, от мелкодисперсных частиц (оксидов кремния, карбонатов кальция и др.). Такая очистка производится через систему отстойников.

*Полученные результаты.* При шлифовании плоских поверхностей изделий из камня [3, 4] наиболее рациональным является использование алмазного инструмента – кругов прямого профиля 1А1 Ø200-350×10-25×3-5×32-75 с параметрами алмазного слоя 250/200-160/125 АС4-АС15 Б1 – 50-100. Т. е. для такого алмазного инструмента в отличие от инструмента, используемого, например, при токарной обработке [1], используются синтетические алмазы с невысокими прочностными свойствами и эластич-

ные связки, что дает возможность получить более высокую чистоту обрабатываемых поверхностей и сэкономить трудозатраты на последующих технологических операциях.

Имеющийся производственный опыт алмазно-абразивной обработки природного камня и изготовления различных изделий из него [3, 4, 9-11] позволил выработать рациональные технологические параметры обработки камней каждой группы. Эти параметры приведены в табл. 3. Основным регулируемым параметром при обработке камня является вертикальная составляющая подачи, которая выбирается в зависимости от принадлежности обрабатываемого камня к определенной их группе.

Таблица 3 – Рекомендуемые технологические параметры чернового шлифования природных камней

№ п/п	Технологические параметры	Рекомендуемые значения
1	Число оборотов шпинделя шлифовальной головки, об./мин.	1425-1750
2	Окружная скорость шлифования, м/с	15-26
3	Вертикальная подача, мм/ход:	
	камни 1 группы обрабатываемости	0,3-0,4
	камни 2 и 3 групп обрабатываемости	0,1-0,3
	камни 4 группы	0,05-0,1
	камни 5 группы	0,025-0,05
4	Продольная подача двойных ходов, ход./мин. (м/мин.)	50-70 (12-15)
5	Поперечная подача, мм/мин.	150-200

При практических расчетах основных показателей качества изделий из камня [12] (например, трудоемкости) на технологических операциях чернового шлифования выполняемых с применением плоскошлифовальных станков различных моделей и алмазно-абразивного инструмента на основании анализа затрат времени на изготовление изделий из камня выработаны нормы оперативного времени ( $HT_{оп}$ ). Эти нормы позволяют оценить трудоемкость обработки плоской поверхности детали из камня. Так, например, норма оперативного времени при обработке на плоскошлифовальных станках камней, относящихся к первой группе составляет 18-22 мин/дм<sup>2</sup>.

*Выводы.* В результате проведенной работы и анализа практического опыта изготовления изделий из природного камня с применением плоскошлифовальных станков и использованием алмазного инструмента установлены рациональные технологические режимы шлифования различных видов природного камня. Выработаны обоснованные нормы времени на

операції шліфування каменя для використання їх при розрахунках показателів якості виробів з каменя.

**Список использованных источников:** 1. Особенности алмазного шлифования природного камня на токарных станках / В. И. Сидорко, В. В. Пегловский, В. Н. Ляхов, Е. М. Поталько // Сучасні технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. – С56 Вип. 4. - Харьков: НТУ «ХПИ». - 2010. – С 217-222. 2. Пат. 28151 Украина, МПК (2006). В28D 1/00, В23В 1/00, Спосіб обробки поверхонь обертання / В. И. Сидорко В. В. Пегловський, В. Н. Ляхов, Е. М. Поталько. – Заявл. 26.07.07; Опубл. 26.11.07, Бюл. № 19. 3. ДСТУ Б В.2.7-37-95. Строительные материалы. Плиты и изделия из природного камня. Технические условия. 4. Изделия камнерезные ТУ У 26.7. – 23504418 – 001: 2007. 5. Пегловский В. В., Сидорко В. И., Ляхов В. Н., Поталико О. М. Оброблюваність природного каміння - об'єктивна основа його класифікації. Частина 8. Класифікація декоративного та напівдорогоцінного каміння за оброблюваністю. // Коштовне та декоративне каміння. Науково-практичний журнал. – Київ: Вид. ДГЦ МФУ, – 2011. – 1. № 63, С 16 – 22. 6. Постановление Кабинета Министров Украины № 512 от 27. 07. 1994г. «Об общей стоимости и оценке стоимости естественных камней». 7. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 томах. Т. 2 / Под ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова.– М.: Машиностроение.– 1985.– 496 с. 8. Данилевский В. В. Справочник техника машиностроителя. – М.; Высшая школа 1962. – 646 с. 9. Пат. 12743 Украина, МКПО 10 – 01. Набор письменный «Парус»/ В. И. Сидорко, В. Н. Ляхов, В. В. Пегловский, Е. М. Поталько. – Заявл. 28.09.05; Опубл. 15.09.06, Бюл. № 9. 10. Пат. 13052 Украина, МКПО 10 – 01. Часы / В. И. Сидорко, В. Н. Ляхов, В. В. Пегловский, Е. М. Поталько. – Заявл. 27.10.05; Опубл. 15.11.06, Бюл. № 11. 11. Пат. 16753 Украина, МКПО 10 – 01. Набор письменный / В. И. Сидорко, В. Н. Ляхов, В. В. Пегловский, Е. М. Поталько. – Заявл. 13.09.07; Опубл. 10.06.08, Бюл. № 11. 12. ДСТУ Б В.2.7-16–95. Строительные материалы. Материалы стеновые каменные. Номенклатура показателей качества.

**Bibliography (transliterated):** 1. Osobennosti almaznogo shlifovaniya prirodnogo kamnja na tokarnyh stankah / V. I. Sidorko, V. V. Peglovskij, V. N. Ljahov, E. M. Potalyko // Suchasni tehnologii v mashinobuduvanni: zb. nauk. prac'. – S56 Vip. 4. - Har'kov: NTU «HPI». - 2010. – S 217-222. 2. Pat. 28151 Ukraina, MPK (2006). B28D 1/00, B23B 1/00, Sposib obrobki poverhon' obertannja / V. I. Sidorko V. V. Peglovs'kij, V. N. Ljahov, E. M. Potalyko. – Zajavl. 26.07.07; Opubl. 26.11.07, Bjul. № 19. 3. DSTU B V.2.7-37-95. Stroitel'nye materialy. Plity i izdelija iz prirodnogo kamnja. Tehnicheskie uslovija. 4. Izdelija kamnereznye TU U 26.7. – 23504418 – 001: 2007. 5. Peglovskij V. V., Sidorko V. I., Ljahov V. N., Potaliko O. M. Obrobljuvanist' prirodnogo kaminnja - ob'ektivna osnova jogo klasifikacij. Chastina 8. Klasifikacija dekorativnogo ta napivdorogocinnogo kaminnja za obrobljuvanistju. // Koshtovne ta dekorativne kaminnja. Naukovo-praktichnij zhurnal. Kiiv: Vid. DGC MFU, – 2011. – 1. № 63, S 16 22. 6. Postanovlenie Kabineta Ministrov Ukrainy № 512 ot 27. 07. 1994g. «Ob obvej stoimosti i ocenke stoimosti estestvennyh kamnej». 7. Spravochnik tehnologa-mashinostroitelja. V 2 tomah. T. 2 / Pod red. A. G. Kosilovoj i R. K. Mewerjakova.– M.: Mashinostroenie.– 1985.– 496 s. 8. Danilevskij V. V. Spravochnik tehnika mashinostroitelja. – M.; Vysshaja shkola 1962. – 646 s. 9. Pat. 12743 Ukraina, MKPO 10 – 01. Nabor pis'mennyj «Parus»/ V. I. Sidorko, V. N. Ljahov, V. V. Peglovskij, E. M. Potalyko. – Zajavl. 28.09.05; Opubl. 15.09.06, Bjul. № 9. 10. Pat. 13052 Ukraina, MKPO 10 – 01. Chasy / V. I. Sidorko, V. N. Ljahov, V. V. Peglovskij, E. M. Potalyko. – Zajavl. 27.10.05; Opubl. 15.11.06, Bjul. № 11. 11. Pat. 16753 Ukraina, MKPO 10 – 01. Nabor pis'mennyj / V. I. Sidorko, V. N. Ljahov, V. V. Peglovskij, E. M. Potalyko. – Zajavl. 13.09.07; Opubl. 10.06.08, Bjul. № 11. 12. DSTU B V.2.7-16–95. Stroitel'nye materialy. Materialy stenovyje kamennye. Nomenklatura pokazatelej kachestva.

*M. RYBICKI*, PhD. Eng.,  
*M. KAWALEC*, Prof. DSc. Eng., Poznań, Poland

## **FORM ERRORS AND TOPOGRAPHY AFTER FACE MILLING WITH VARIOUS MACHINING PARAMETERS**

*М. РУБИЦКІ, М. КАВАЛЕЦЬ*

*ПОХИБКИ ФОРМИ І ТОПОГРАФІЯ ПІСЛЯ ФРЕЗЕРУВАННЯ З РІЗНИМИ  
ПАРАМЕТРАМИ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ*

У роботі представлена оцінка впливу умов різання на шорсткість поверхні обробленої під час торцевого фрезерування загартованої сталі. Як змінні умови прийняли головним чином глибину обробки, подачу й число лез торцевої фрези. Підтверджено, що фрезерування з більшою глибиною обробки, подачею й числом ріжучих лез приводить до більших погрешностей форми обробленої поверхні. Знаходження однорідних оброблювальних слідів двоспрямованих не обов'язково має свідчити про більшу площину обробленої поверхні чим в односпрямованих слідів.

В работе представлена оценка влияния условий резания на шероховатость поверхности обработанной во время торцевого фрезерования закаленной стали. В качестве переменных условий приняли главным образом глубину обработки, подачу и число лезвий торцевой фрезы. Подтверждено, что фрезерование с большей глубиной обработки, подачей и числом режущих лезвий приводит к большим погрешностям формы обработанной поверхности. Нахождение однородных обработочных следов двунаправленных не обязательно должно свидетельствовать о большей плоскости обработанной поверхности чем у однонаправленных следов.

In work the estimation of influence of conditions of cutting on a roughness of a surface of the tempered steel processed during face milling is presented. As variable conditions have accepted mainly depth of processing, submission and quantity edges of a face mill. It is confirmed, that milling with greater depth of processing, submission and quantity cutting edges leads to greater errors of the form of the processed surface. The finding homogeneous traces bidirectional not necessarily should testify to a greater plane of the processed surface than at the unidirectional traces.

### **1. INTRODUCTION**

Accurate machining of hardened steel, especially turning and milling [1, 4-7], is treated recently as finish operation replacing grinding. Therefore machined surface accuracy, determined by roughness or dimensional tolerances of workpiece, has a great importance in the processes. Many results of research [2, 3, 5-7] indicate that during face milling high flatness error can be expected. The error consist of deviation  $STR_{t_w}$  and  $STR_{t_p}$  in logitudinal and transverse section respectively.

## 2. RANGE, CONDITIONS AND TECHNIQUE OF RESEARCH

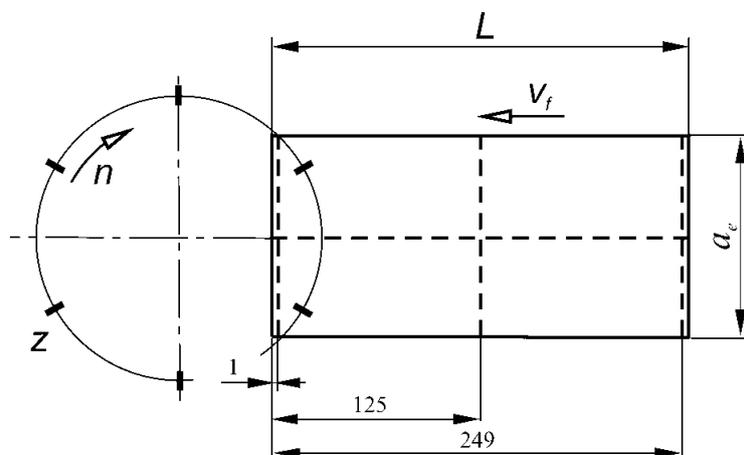
Research have been carried out on the FND32F milling machine made of AVIA. As workpiece was used slab made of the 55NiCrMoV ( $52\pm 1$ HRC) steel with dimensions  $L \times a_e = 250 \times 75,3$ mm. Surface of the slab was milled by one, two and six wedges fixed to face mill 4.01006R323 (made of Kennametal) and diameter  $D=87$  mm. For milling round wedges RNGN 120700 T01020 made of mixed ceramics, grade KY1615 (made of Kennametal) were used.

Table 1 – Range of research

No.	$a_p$ [mm]	$f_z$ [mm/tooth] ( $v_f$ [mm/min])	$n$ [rev/min] ( $v_c$ [m/min])	$z$ ( $z_c$ )
1	0,05	0,15 (168)	1120 (306)	1 (0,33)
2	0,20			
3		0,15 (504)		3 (1)
4	0,50	0,15 (639)	710 (194)	6 (2)
5		0,08 (341)		

Machining conditions is presented in tab. 1. In passes done by the face mill with six wedges rotational speed was decreased due to power of machine tool. In each of conditions 1-5 three passes were done, after which machined surface profiles have been registered.

For recording of machined surface profiles incremental length gauge MT12B with resolution 0,0005 mm and ball-shaped contact tip was used. Values  $STRt_w$  and  $STRt_p$  of deviations were given as a distance between maximal and minimal position of approximated profiles points measured relative to movement path of the gauge. The profiles recording was done in section presented in fig. 1 Scatter of measured quantities  $STRt_w$  and  $STRt_p$  was characterized in figures as a maximum range.



-- places of the profiles recording

Figure 1 – Recording places of profiles in longitudinal and transverse sections

### 3. RESULTS AND ANALYSIS OF RESEARCH

From figures 2 and 3 follows that both deviations  $STRt_w$  in longitudinal sections and  $STRt_p$  in transverse sections increases with increasing of the mill load (rise of the  $a_p, f_z$  and  $z_c$ ).

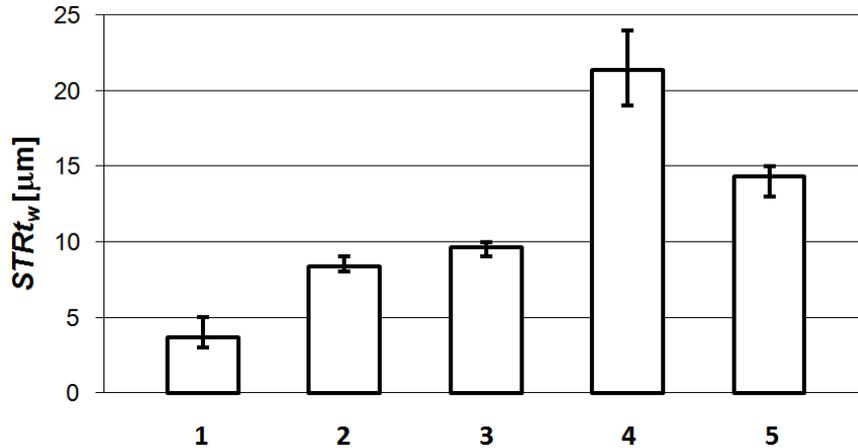


Figure 2 – Influence of face milling conditions (1-5 according to tab. 1) on deviation  $STRt_w$  in middle longitudinal section

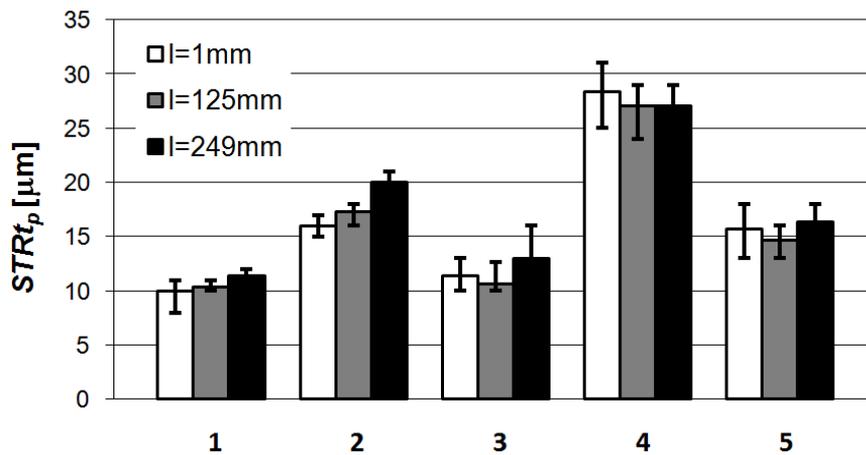


Figure 3 – Influence of face milling conditions (1-5 according to tab. 1) on deviation  $STRt_p$  in transverse section measured in various milling lengths  $l$

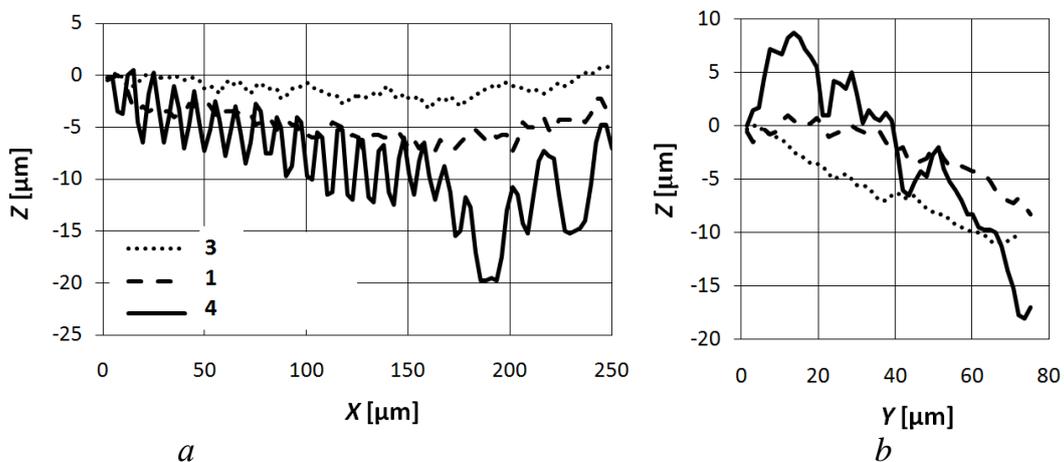


Figure 4 – Influence of face milling conditions (1-5 according to tab. 1) on profiles of machined surface in middle longitudinal a) and transverse b) sections

Many literature sources [6, 7] indicate that in order to obtain flat surface after face milling axis of the mill must be set perpendicular to feed direction. In the conditions whole machined surface has homogenous bi-directional lays. From fig. 4 and 5 follows that it can not to be true. Static tilt of face mill axis is changing due to machining forces. As given in [5], when thrust force is higher back of the mill goes down and bi-directional lays can forms. Repeated cutting of machined surface by back of the mill occurred for some of the passes in conditions 2 and 3 as well as for all passes in conditions 4 and 5 (fig. 5). It caused arising of lesser concave profile in transverse section (fig. 4).

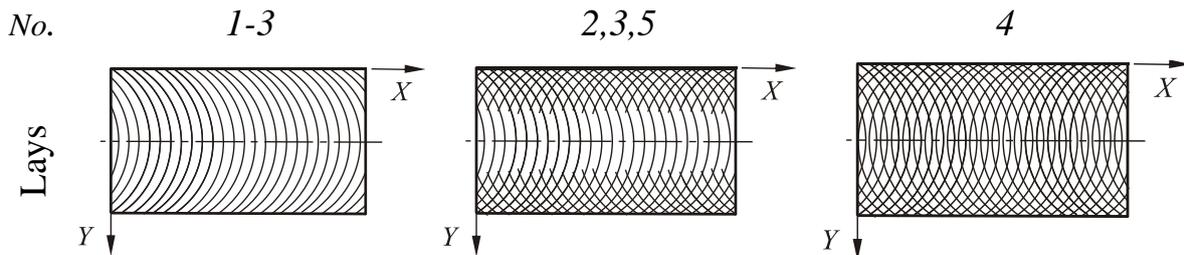


Figure 5 – Lays obtained in applied face milling conditions (1-5 according to tab. 1)

#### 4. CONCLUSIONS

When milling with higher depth of cut  $a_p$ , feedrate  $f_z$  and number of wedges  $z_c$  higher form errors of machined surface (deviations  $STR_{t_w}$  and  $STR_{t_p}$ ) are obtained. Occurance of homogenous bi-directional lays can not testify higher flatness of machined surface than for uni-directional lays.

**References:** **1.** Kawalec, M., - Król, G., - Grabchenko, A.I., - Zubar, B.P. (1999): Ekonomicheskaja skorost' rezanija pri tochenii zakalenoj podshipnikovoj stali plastinami iz nitrida bora i instrumentalnoj keramiki. Sbornik Nuchnykh Trudov KhGPU, Khar'kov, Vyp. 7, Ch. II, p. 128-130, **2.** Kolman, R., - Meller, E., - Meller A. (1969): Dokładność kształtu i położenia w procesach technologicznych, Warszawa, **3.** Korsakov, V.S. (1961): Tochnost' mekhanicheskoy obrabotki. Mashgiz, Moskva, **4.** Novikov, N.B., - Devin, L.N. (2002): Naddezhnost' lezviynykh instrumentov iz PSTM pri chistovom tocheni zakalennykh stalej. Zbirnik nauchnykh trudov „Voprosy mekhaniki i fiziki processov rezahija i kholodnogo plasticheckogo deformirovanija” K 100-letiju so dnja rozhdenija profesora A.M. Rozenberga, Nacional'naja Akademiya Nauk Ukrainy, Institut Sverkhtverdykh Materialov im. V.N. Bakulja, Kiev, p. 273-280, **5.** Rybicki, M. (2008): Odchyłki zarysu powierzchni obrobionej zahartowanej stali i ich minimalizacja w procesie frezowania czołowego, Rozprawa doktorska, promotor prof. M. Kawalec, Wydział Budowy Maszyn i Zarządzania, Politechnika Poznańska, Poznań, **6.** Rybicki, M., - Kawalec, M. (2010): Form deviations of hot work tool steel 55NiCrMoV (52HRC) after face finish milling. International Journal of Machining and Machinability of Materials, Vol. 7, No.3/4, p. 176-192, **7.** Rybicki, M., - Kawalec, M. (2010): Selected problems of face micro-milling of hard steel. Suczasnii Technologii w Masinobudyvanni. Zbirnik Naukovich Prac. Vyp. 4, NTU ChPI, 2010, Charkiv, Ukraina, s. 86-91.

# ИНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 621.7

**В.Л. ДОБРОСКОК**, д-р техн. наук, **Л.Н. АБДУРАЙИМОВ**,  
**С.И. ЧЕРНЫШОВ**, канд. техн. наук,  
**М.М. БУДЕННЫЙ**, канд. техн. наук, Харьков, Украина

## КРИТЕРИИ КАЧЕСТВА ТРИАНГУЛЯЦИИ 3D МОДЕЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ

У статті розглянуті критерії якості тріангуляції 3D моделей промислових виробів, одержуваних в САD-системах для наступної матеріалізації інтегрованими технологіями (Rapid Prototyping). Розглянуті існуючі й запропоновані нові узагальнені нормалізовані критерії, що дозволяють підвищити рівень оцінки якості тріангуляції.

В статье рассмотрены критерии качества триангуляции 3D моделей промышленных изделий, получаемых в САD-системах для последующей материализации интегрированными технологиями (Rapid Prototyping). Рассмотрены существующие и предложены новые обобщенные нормализованные критерии, позволяющие повысить уровень оценки качества триангуляции.

*V.L. DOBROSKOK, L.N. ABDURAJIMOV, S.I. CHERNYSHOV, M.M. BUDYONNIY  
CRITERIA OF QUALITY OF THE TRIANGULATION 3D MODELS OF INDUSTRIAL  
PRODUCTS*

The article considers the quality criteria of the triangulation of 3D models of industrial products, obtained in CAD-systems for further materialization by integrated technologies (Rapid Prototyping). Reviewed existing and proposed new summarized and normalized criteria to improve the quality evaluation of the triangulation.

### *Постановка проблеми*

Высокие требования к техническим характеристикам промышленных изделий, получаемых технологиями Rapid Prototyping, определяют необходимость использования качественных исходных 3D моделей.

Современные системы твердотельного 3D моделирования, оперируют объектами, называемыми телами. В общем случае твердотельный объект может быть построен на базе связанных поверхностей различных типов, ограничивающих занимаемую телом часть пространства. Могут использоваться как плоские, так и криволинейные поверхности различных порядков. При подготовке моделей для последующей материализации используются только плоские поверхности. Тогда такие тела называют многогранниками [8] (полигонами, плоскогранными или фасеточными) [4]. Криволинейные поверхности аппроксимируют системой треугольных или

четырёхугольных плоских граней с использованием специальных алгоритмов преобразования. Процесс, при котором формообразующие поверхности твердого тела аппроксимируются системой треугольных граней, называется дискретизацией или триангуляцией (триангулированием) [5]. В свою очередь, треугольники могут быть как криволинейными, так и прямолинейными. Применительно к технологиям Rapid Prototyping рассматривается только триангуляция прямолинейными треугольниками.

Для практических целей используются различные методы триангуляции. Все методы триангуляции по принципу построения можно разбить на два больших класса: прямые [3] и итерационные [2] (рис. 1). По сфере применения можно выделить две схемы триангуляции (рис. 2):

- двумерная, когда плоский многоугольник покрывается множеством треугольников (рис. 2, а);

- трехмерная, которая может использовать в качестве элементов аппроксимации, как плоские треугольники (рис. 2, б), так и тетраэдры (рис. 2, в). В первом случае поверхность модели покрывается множеством связанных и неперекрывающихся между собой 4-х треугольников  $\{V_1V_2V_3, V_1V_4V_2, V_3V_2V_4, V_1V_3V_4\}$ . Во втором случае внутренний объем трехмерного тела разбивается на множество неперекрывающихся между собой 8-ми тетраэдров  $\{V_1V_5V_8V_{10}, V_2V_5V_6V_7, V_3V_7V_9V_{10}, V_4V_6V_8V_9, V_5V_6V_7V_{10}, V_5V_6V_8V_{10}, V_6V_7V_9V_{10}, V_6V_8V_9V_{10}\}$ .

Качество изготавливаемых промышленных изделий достигается за счет использования достаточно точных и корректных триангуляционных 3D моделей. Причем качество триангуляции зависит как от количества треугольников, так и от их геометрических характеристик.

Поскольку триангуляционная модель формируется на базе твердотельной CAD модели изделия, то следует выявить связь критериев качества с аппроксимационными свойствами триангуляционной модели.

#### *Анализ литературы*

Качество модели существенно зависит от геометрических характеристик элементов аппроксимации [6, 7]. В настоящее время, применительно к трехмерной триангуляции моделей изделий тетраэдрами, предложено достаточно много специальных критериев качества [3, 7, 9, 10, 11].

В табл. 1 приведены критерии качества с расчетными формулами, интервалами возможных значений и оптимальными значениями, которые рассчитаны для идеального случая – правильного тетраэдра. Значения приведены с точностью до 6 значащих цифр.

Основным недостатком приведенных критериев является различие интервалов возможных значений (табл. 1), что существенно затрудняет оценку качества триангуляции 3D моделей.

*Цель статьи* – рассмотреть существующие и предложить новые обобщенные нормализованные критерии, позволяющие повысить уровень оценки качества триангуляции.

*Изложение основного материала*

В результате анализа была предложена система обобщенных нормализованных критериев качества триангуляции: дифференциальных (на уровне треугольников) и интегральных (на уровне модели в целом). Нормализация критериев обеспечивается путем ввода в расчетные зависимости нормализующих коэффициентов для приведения интервалов возможных значений к единому диапазону (0, 1]. Значение 0 (левая граница интервала возможных значений) критерии принимать не могут в связи исключения из рассмотрения вырожденных треугольников с нулевыми линейными и угловыми характеристиками. Оптимальные значения критериев рассчитывались для случая правильного треугольника и для всех критериев соответствуют 1 (правая граница интервала возможных значений). Условно критерии качества триангуляции можно разделить на две группы – на базе линейных и угловых характеристик треугольников.

Применительно к единичному элементу триангуляционной модели (рис. 3) приведем дифференциальные критерии качества:

- отношение длины наименьшей стороны треугольника  $l_{\min} = \text{MIN}(l_1, l_2, l_3)$  к радиусу описанной окружности  $R$ :

$$Q_1 = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{l_{\min}}{R}; \quad (1)$$

- отношение радиуса вписанной окружности  $r$  к длине наибольшей стороны треугольника  $l_{\max} = \text{MAX}(l_1, l_2, l_3)$ :

$$Q_2 = 2\sqrt{3} \frac{r}{l_{\max}}; \quad (2)$$

- отношение радиуса вписанной окружности  $r$  к радиусу описанной  $R$ :

$$Q_3 = 2 \frac{r}{R}; \quad (3)$$

- отношение длин наименьшей стороны треугольника  $l_{\min} = \text{MIN}(l_1, l_2, l_3)$  к наибольшей  $l_{\max} = \text{MAX}(l_1, l_2, l_3)$ :

$$Q_4 = \frac{l_{\min}}{l_{\max}}; \quad (4)$$

• отношение площади треугольника  $S$  к сумме квадратов длин его сторон  $l_1^2 + l_2^2 + l_3^2$ :

$$Q_5 = 4\sqrt{3} \frac{S}{\sum_{i=1}^3 l_i^2}; \quad (5)$$

• отношение наименьшего  $\varphi_{\min} = \text{MIN}(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3)$  угла треугольника к наибольшему  $\varphi_{\max} = \text{MAX}(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3)$ :

$$Q_6 = \frac{\varphi_{\min}}{\varphi_{\max}}; \quad (6)$$

• отношение площадей вписанных  $S_r$  и описанных  $S_R$  окружностей треугольника:

$$Q_7 = 4 \frac{S_r}{S_R}; \quad (7)$$

• отношение площади треугольника  $S$  к квадрату длины наибольшей его стороны  $l_{\max}^2 = \text{MAX}(l_1, l_2, l_3)^2$ :

$$Q_8 = \frac{4}{\sqrt{3}} \frac{S}{l_{\max}^2}. \quad (8)$$

Из приведенного списка критериев качества можно исключить критерии  $Q_7, Q_8$ , т. к. они являются производными от  $Q_3, Q_5$  соответственно, тогда критерии  $Q_1 \dots Q_6$ , будут являться наиболее представительными.

В качестве основных интегральных критериев качества триангуляции в работе рассматривались:

• среднее арифметическое значений дифференциальных критериев качества:

$$Q_a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Q_i; \quad (9)$$

где:  $N$  – количество элементов триангуляции;

• среднее гармоническое значений дифференциальных критериев качества:

$$Q_g = N / \sum_{i=1}^N \frac{1}{Q_i}. \quad (10)$$

Особенностью среднего гармонического, как общего показателя качества модели, является повышенная чувствительность к появлению отдельных малых значений.

Сравнительный анализ качества триангуляции систем 3D моделирования промышленных изделий выполнялся для наиболее распространенных CAD-систем: *SolidWorks*, *PowerSHAPE*, *КОМПАС-3D*, *T-FLEX Parametric CAD*, *AutoCAD*, *Geomagic Studio*, *MeshLab*, *Magics*. В качестве тестовых моделей были выбраны базовые геометрические тела, наиболее часто используемые в машиностроении: куб, цилиндр, конус и сфера (рис. 4). Предварительные расчеты показали, что наиболее целесообразно использовать критерий  $Q_2$  – отношение радиуса вписанной окружности к длине наибольшей стороны треугольника.

Значения интегральных критериев качества триангуляции тестовых моделей приведены в табл. 2. Для каждой модели указано количество элементов (треугольников и вершин), полученных при экспорте из соответствующей CAD-системы в триангуляционное представление. Параметры экспорта модели выбирались по умолчанию. Отличия в количестве элементов аппроксимации у одинаковых моделей свидетельствует о применении CAD-системами различных собственных алгоритмов триангуляции. В таблице также приведены минимальные  $Q_{\min}$ , средние арифметические  $Q_a$  и гармонические  $Q_g$  значения выбранного критерия качества.

Анализ результатов (табл. 2) позволяет ранжировать рассмотренные 3D CAD-системы моделирования по степени убывания качества триангуляции следующим образом: *Geomagic Studio*, *MeshLab*, *КОМПАС-3D*, *AutoCAD*, *T-FLEX Parametric CAD*, *SolidWorks*, *PowerSHAPE* и *Magics*.

#### Выводы

Предложенные новые обобщенные нормализованные критерии позволяют существенно повысить уровень оценки качества триангуляции 3D моделей. Нормализация критериев обеспечивается путем ввода в расчетные зависимости нормализующих коэффициентов для приведения интервалов возможных значений к единому диапазону (0, 1]. Оптимальные значения соответствуют 1 (правильный треугольник).

Сравнительный анализ качества триангуляции систем 3D моделирования промышленных изделий для наиболее распространенных CAD-систем: *SolidWorks*, *PowerSHAPE*, *КОМПАС-3D*, *T-FLEX Parametric CAD*, *AutoCAD*, *Geomagic Studio*, *MeshLab*, *Magics* показал работоспособность предложенного подхода.

Результаты работы создают методологическую основу для последующего изучения характеристик триангуляционных моделей.

**Список использованных источников:** 1. Возможности современных САД систем при переходе к триангулированным моделям / В.Л. Доброскок, Я.Н. Гаращенко, С.И. Чернышов [и др.] // Високі технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. – 2010. – Вип. 1 (20). – С. 79-86. 2. Галанин М.П. Разработка и реализация алгоритмов трехмерной триангуляции сложных пространственных областей: итерационные методы / Галанин М.П., Щеглов И.А. - М.: ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 2006. – № 9. – 32 с. - (Препринт / РАН, ИПМ им. М.В. Келдыша ; 06-01-00421). 3. Галанин М.П. Разработка и реализация алгоритмов трехмерной триангуляции сложных пространственных областей: прямые методы / Галанин М.П., Щеглов И.А. – М.: ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 2006. – № 10. – 32 с. – (Препринт / РАН, ИПМ им. М.В. Келдыша ; 06-01-00421). 4. Голованов Н.Н. Геометрическое моделирование / Н.Н. Голованов. – М.: Изд-во Физ.-мат. лит., 2002. – 472 с. 5. Скворцов А.В. Обзор алгоритмов построения триангуляции Делоне / А.В. Скворцов // Вычислительные методы и программирование. – 2002. – Т.3. – С. 14-39. 6. Сьярле Ф. Метод конечных элементов для эллиптических задач / Ф. Сьярле; пер. с англ. Б.И. Квасова. – М.: Изд-во «Мир», 1980. – 512 с. 7. Шайдуров В.В. Многосеточные методы конечных элементов / В.В. Шайдуров. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. – 288 с. 8. Энциклопедия элементарной математики: В 5 т. / Физматгиз. – М., 1963. – Т. 4: Геометрия. – 568 с. 9. Mesh Generation for Technology CAD in Three Dimensions [Электронный ресурс] / P. Fleischmann // Dissertation. - 1999. - Режим доступа: <http://www.iue.tuwien.ac.at/phd/fleischmann/diss.html>. 10. Sequential and Parallel Generation of Unstructured 3D Meshes [Электронный ресурс] / D. Rypl // Thesis. – 2005. – Режим доступа: <http://power2.fsv.cvut.cz/~dr/papers/>. 11. Zheng Y. Three-dimensional unstructured mesh generation: Part 3. Volume meshes / Y. Zheng, R.W. Lewis, D.T. Gethin // Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. – 1996. – Vol. 134. – P. 285-310.

**Bibliography (transliterated):** 1. Vozmozhnosti sovremennyh CAD sistem pri perehode k triangulirovannym modeljam / V.L. Dobroskok, Ja.N. Garawenko, S.I. Chernyshov [i dr.] // Visoki tehnologii v mashinobuduvanni: zb. nauk. prac'. – 2010. – Vip. 1 (20). – S. 79-86. 2. Galanin M.P. Razrabotka i realizacija algoritmov trehmernoj trianguljacji slozhnyh prostranstvennyh oblastej: iteracionnye metody / Galanin M.P., Weglov I.A. - M.: IPM im. M.V. Keldysha RAN, 2006. – № 9. – 32 s. - (Preprint / RAN, IPM im. M.V. Keldysha ; 06-01-00421). 3. Galanin M.P. Razrabotka i realizacija algoritmov trehmernoj trianguljacji slozhnyh prostranstvennyh oblastej: prjamye metody / Galanin M.P., Weglov I.A. – M.: IPM im. M.V. Keldysha RAN, 2006. – № 10. – 32 s. – (Preprint / RAN, IPM im. M.V. Keldysha ; 06-01-00421). 4. Golovanov N.N. Geometricheskoe modelirovanie / N.N. Golovanov. – M.: Izd-vo Fiz.-mat. lit., 2002. – 472 s. 5. Skvorcov A.V. Obzor algoritmov postroenija trianguljacji Delone / A.V. Skvorcov // Vychislitel'nye metody i programmirovanie. – 2002. – T.3. – S. 14-39. 6. S'jarle F. Metod konechnyh jelementov dlja jellipticheskikh zadach / F. S'jarle; per. s angl. B.I. Kvasova. – M.: Izd-vo «Mir», 1980. – 512 s. 7. Shajdurov V.V. Mnogosetochnye metody konechnyh jelementov / V.V. Shajdurov. – M.: Nauka. Gl. red. fiz.-mat. lit., 1989. – 288 s. 8. Jenciklopedija jelementarnoj matematiki: V 5 t. / Fizmatgiz. – M., 1963. – T. 4: Geometrija. – 568 s. 9. Mesh Generation for Technology CAD in Three Dimensions [Jelektronnyj resurs] / P. Fleischmann // Dissertation. - 1999. - Rezhim dostupa: <http://www.iue.tuwien.ac.at/phd/fleischmann/diss.html>. 10. Sequential and Parallel Generation of Unstructured 3D Meshes [Jelektronnyj resurs] / D. Rypl // Thesis. – 2005. – Rezhim dostupa: <http://power2.fsv.cvut.cz/~dr/papers/>. 11. Zheng Y. Three-dimensional unstructured mesh generation: Part 3. Volume meshes / Y. Zheng, R.W. Lewis, D.T. Gethin // Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. – 1996. – Vol. 134. – P. 285-310.

**A. G. MAMALIS**, Dr. Sc. tech., Athens, Greece,  
**A. I. GRABCHENKO**, Dr. Sc. tech.,  
**V. A. FEDOROVICH**, Dr. Sc. tech., Kharkiv, Ukraine,  
**J. KUNDRAK**, Dr. Sc. tech., Miskolc, Hungary,  
**E. A. BABENKO**, Kharkiv, Ukraine

### **3D SIMULATION OF DIAMOND GRINDING PROCESS BY FINITE ELEMENT METHOD**

*МАМАЛІС А.Г., ГРАБЧЕНКО А.І., ФЕДОРОВИЧ В.О., КУНДРАК Я., БАБЕНКО Є.О.  
3D МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ АЛМАЗНОГО ШЛІФУВАННЯ МЕТОДОМ  
СКІНЧЕНИХ ЕЛЕМЕНТІВ*

Процес виготовлення алмазних кругів на органічних зв'язках відрізняється високою трудомісткістю і низькою продуктивністю праці, високим рівнем витрати дорогих алмазних зерен і, як наслідок, високою собівартістю подальшого процесу експлуатації алмазного круга. Існує потреба в підвищенні надійності та якості алмазно-абразивного інструменту, без чого нераціонально їх застосування у виробництві. Виробництво алмазно-абразивного інструменту базується на обґрунтованому поєднанні фізичних та технологічних закономірностей процесу спікання алмазоносного шару. На даний момент немає науково обґрунтованих рекомендацій щодо вибору раціональної комбінації сил різання, марки зерна, зернистості круга і його концентрація з фізико-механічними властивостями зв'язки. Метою даного дослідження є визначення оптимального поєднання властивостей алмазних зерен і зв'язки, при якому забезпечується утримання алмазних зерен та їх цілісність. Процесу виготовлення алмазного круга передують теоретичні дослідження процесу спікання з використанням 3D-моделювання напружено-деформованого стану алмазоносного шару.

Ключові слова: алмазне зерно, метод скінчених елементів, 3D-моделювання, алмазний круг, синтетичні алмази, алмазне шліфування.

Процесс изготовления алмазных кругов на органических связках отличается высокой трудоемкостью и низкой производительностью труда, высоким уровнем расхода дорогостоящих алмазных зерен и, как следствие, высокой себестоимостью дальнейшего процесса эксплуатации алмазного круга. Необходимо повышение надежности и качества алмазно-абразивного инструмента, без чего нерационально их применение в производстве. Производство алмазно-абразивного инструмента базируется на обоснованном сочетании физических и технологических закономерностей процесса спекания алмазоносного слоя. На данный момент нет научно обоснованных рекомендаций по выбору рациональной комбинации сил резания, марки зерна, зернистости круга и его концентрация с физико-механическими свойствами связки. Целью данного исследования является определение оптимального сочетания прочностных свойств алмазных зерен и связки, при котором обеспечивается удержание алмазных зерен и их целостность. Процесу изготовления алмазного круга предшествует теоретическое исследование процесса спекания с использованием 3D-моделирования напряженно-деформированного состояния алмазоносного слоя.

Ключевые слова: алмазное зерно, метод конечных элементов, 3D-моделирование, алмазный круг, синтетические алмазы, алмазное шлифование.

Process of manufacture of diamond wheels on various bonds is characterized by high labour content and low productivity, high consumption of expensive diamond grains and, as consequence, the high cost price of a further operational process of diamond wheels. It is necessary to attain reliability and quality heightening at diamond-abrasive tool manufacture without which its effective application in production is impossible. Production of diamond - abrasive tool is founded on establishment of physical and technological regularities of sintering process of diamond-bearing layer. Now there are no scientifically based recommendations for choice of the rational combinations of strength, brand of grain, graininess, concentration with the physical-mechanical properties of bonds.

The aim of given research is the development of the technique of the theoretical definition of an optimal combination of strength properties of diamond grains and bond at which ones retention of diamond grain integrity at the process of manufacture of diamond wheel is ensured by using 3D simulations of deflected mode of sintering area of its diamond-bearing layer.

Key words: diamond grain, finite element method, 3d-simulation, diamond wheel, synthetic diamond, diamond grinding.

*Problem definition.* Process of manufacture of diamond wheels on various bonds is characterized by high labour content and low productivity, high consumption of expensive diamond grains and, as consequence, the high cost price of a further operational process of diamond wheels. It is necessary to attain reliability and quality heightening at diamond-abrasive tool manufacture without which its effective application in production is impossible. Production of diamond - abrasive tool is founded on establishment of physical and technological regularities of sintering process of diamond-bearing layer. Modern trends in the creation of science-intensive products are characterized by the dramatic widening of applied mathematics, in many respects connected with the creation and development of computer aids [1–4]. Now there are no scientifically based recommendations for choice of the rational combinations of strength, brand of grain, graininess, concentration with the physical-mechanical properties of bonds. In worldwide practice, one can see the tendency of transition from two-dimensional (2D) to 3D computerized simulation to match the advancement in computational power [5–8]. Guidelines, available in the literature, concerning application of some combinations of brands of bond and diamond grain, their concentration in grinding wheels on various bonds are of the common character and using of these recommendations leads to the fracture of diamond grains during sintering process and further low productivity of abrasive processing [9,10].

*The analysis of last researches and publications* has shown that the problem of effectiveness increase of diamond grinding is still topical and modern methods of mathematical simulation can introduce significant results. According to academician Loladze T.N., during the operation phase of diamond-abrasive tool the coefficient of effective utilization of diamond grains does not exceed 5-10 %, other grains fail as early as fabrication stage or fall out during wheel run-

ning. Therefore at the initial stage of manufacture of diamond wheel on various bonds it is important to define optimal technological parameters of its manufacture, namely pressure, temperature and sintering time at which integrity retention of diamond grains will be provided. At the next stage of operation of sintered wheels, it is necessary to consider and study the factors diminishing productivity of diamond grinding process that in the future will allow to decrease their influence and to achieve high utilization factor of diamond grains.

*Research objective.* The purpose of given work is the development of the technique of the theoretical definition of an optimal combination of strength properties of diamond grains and bond at which ones retention of diamond grain integrity at the process of manufacture of diamond wheel is ensured by using 3D simulations of deflected mode of sintering area of its diamond-bearing layer.

*Basic research.* Sintering process of diamond-bearing layer of grinding wheels has been studied by means of 3D-simulation of this process. The mathematical model "bond – grain – metal phase" was considered taking into account influence of components of this system on its deflected mode during sintering process. The influence of the properties of metal phase (metal-catalyst) and its percentage on change of internal equivalent stress in diamond grain has been studied. Thus the process was modelled for several brands of diamond grains and the obtained results were compared. Influence of availability of coatings on diamond grains is studied and the coating composition, allowing to diminish equivalent stress in grain, is defined [11].

In the model the grain and the bond were considered as elastic continuous bodies. Diamond grains were modelled in the form of octahedrons (fig. 1) with dimensions depending on considered graininess from  $50 \times 30 \times 30$  to  $500 \times 300 \times 300$   $\mu\text{m}$  (fig. 1b). The presence of metal-catalyst in diamond grains was modelled by random oriented plates which volume content was 5-10 % [12]. The availability of two metal phases, placed near octahedron faces, was considered. The wheel bond was represented in the form of a cubic fragment with dimensions from  $0,5 \times 0,5 \times 0,5$  to  $3 \times 3 \times 3$  mm depending on size and concentration of grains. The model was loaded by static uniaxial uniformly distributed load, in the form of imposed pressure and temperature. The calculated 3D-model has been developed and computation of deflected mode in the model were carried out in the software CosmosWorks.

Since ultimate tensile strength of diamond is less than ultimate compression strength, so maximal tensile stress of diamond of various brands and graininess obtained by computation was accepted as the fracture criterion [13].

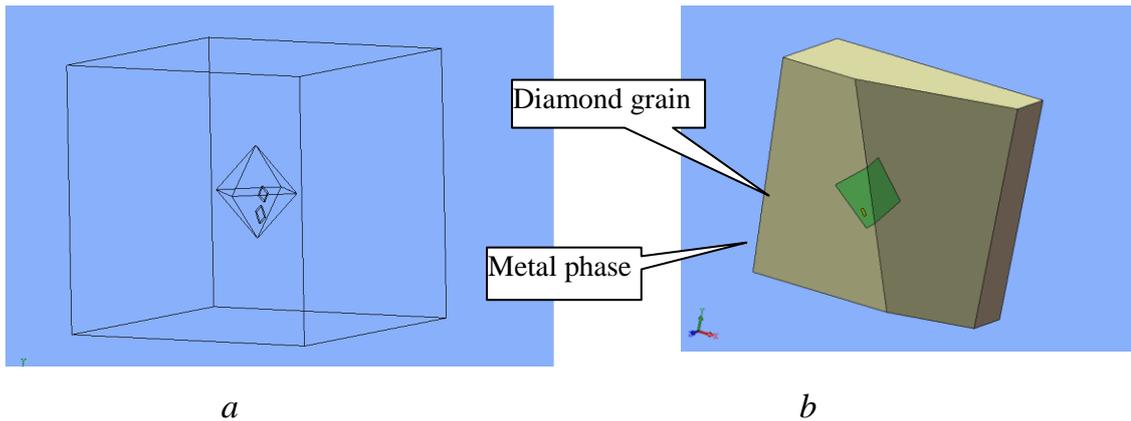


Figure 1 – Computational model (a) and 3D-model of system "diamond grain – metal phase" (b)

Finite-element mesh has been generated after developing of computational 3D-model, and the mesh becomes thicker in a place of presence of diamond grain and metal-catalyst (fig. 2).

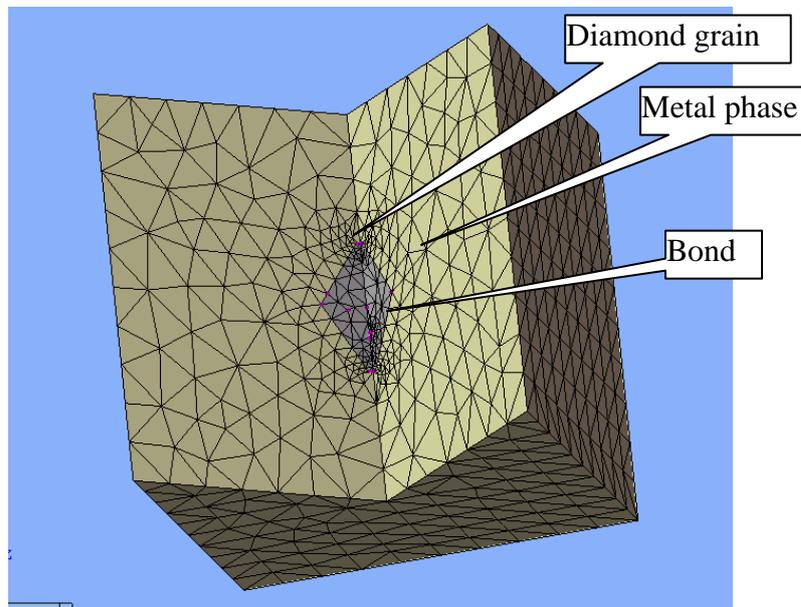


Figure 2 – Generated finite-element mesh in 3D model

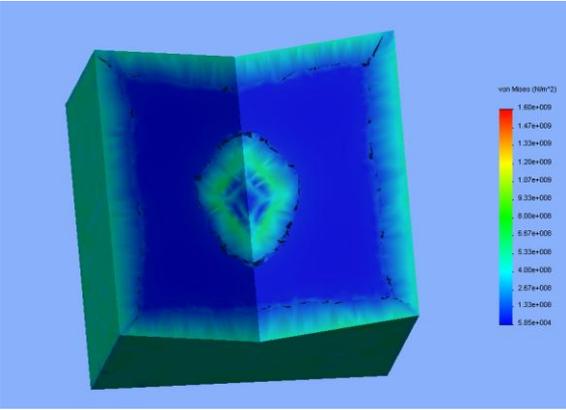
The fulfilled theoretical researches have displayed that diamond-bearing layer sintering temperature, unlike pressure, makes the greatest impact on the deflected mode of the system "diamond grain – metal phase – bond", irrespective of the kind of bond. The increase in stress in grains is observed on a contour of the sphere inscribed in an octahedron, and in places of concentration of metal phase in grain. The availability of bundle of metal contamination in crystals leads to decrease of their strength and especially thermal stability. It is defined that heating of synthetic diamonds, since temperature of 750 °C, leads to decrease of their strength.

The reason of diamond grain cracking is different values of coefficients of thermal extension of metal phase (the metal-catalyst rests) and diamond grain. As a rule, coefficient of thermal extension of metal-catalyst is much more, than for a synthetic diamond. Therefore so-called fracture of diamond grain from within occurs when heating up. Influence of sintering temperature of diamond-bearing layer on equivalent stress change occurring in grain of diamond wheels based on the of various kind of bond [14] is shown in fig. 3 and 4.

Having defined a significant role of the temperature factor in fracture of diamond grains we have passed to studying of influence of metal-catalyst properties on diamond integrity retention in the process of sintering diamond-bearing layer.

Four types of metal phase (with the dominating contents of iron, cobalt, nickel and copper) and a bond on the basis of ceramics, the titan, aluminium, iron and bronze were considered. Computational models "bond – metal phase – grain" were loaded with temperature 400 and 800 °C. Thus, the combination of components of given system was made to define an optimal combination of elements. Simulation of sintering process of diamond-bearing layer element was carried out for grain AC100, concentration 200/160. Maximal values of equivalent stress (tab. 1) which were compared to values of ultimate tensile strength of synthetic diamond have been obtained during computation. Analysing results of computations, it is possible to come to the conclusion that such combinations of grains and bond when metal phase of grains has low coefficient of thermal expansion and low coefficient of elasticity, and a bond in turn is enough durable, are optimal. Besides that the value of coefficient of thermal expansion should be determinative when sampling metal-catalyst.

Brand of bond: Fe  
 Brand of grain: AC50  
 Graininess: 125/100  
 Sintering temperature: 400°C  
 Maximal value  $\sigma_{equiv}$ : 1,25 GPa



Brand of bond: Fe  
 Brand of grain: AC50  
 Graininess: 125/100  
 Sintering temperature: 700°C  
 Maximal value  $\sigma_{equiv}$ : 2,01 GPa

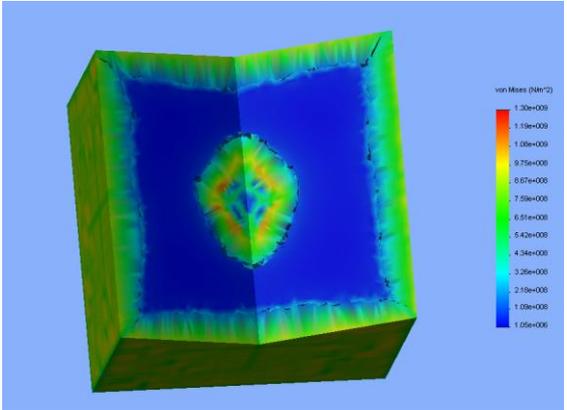
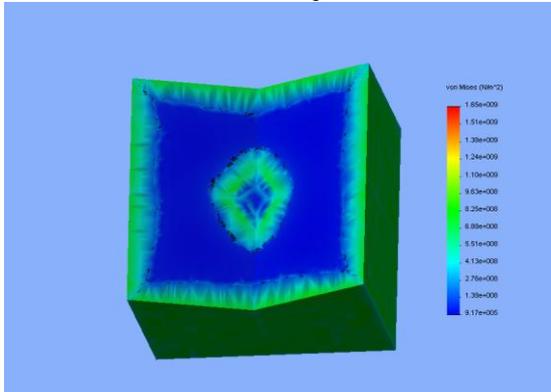


Figure 3 – Dependence of equivalent stress on temperature for wheels on metal bonds

Brand of bond: Ceramic  
 Brand of grain: AC50  
 Graininess: 125/100  
 Sintering temperature: **400°C**  
 Maximal value  $\sigma_{equiv}$ : **1,50 GPa**



Brand of bond: Ceramic  
 Brand of grain: AC50  
 Graininess: 125/100  
 Sintering temperature: **700°C**  
 Maximal value  $\sigma_{equiv}$ : **2,71 GPa**

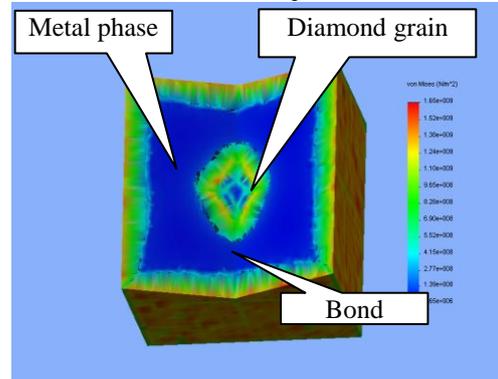


Figure 4 – Dependence of equivalent stress on temperature for wheels on ceramic bonds

Table 1 – Maximal values of equivalent stress at various components of the system "bond – metal phase – grain" with diamond grain AC100 (200/160)

Brand of the bond	Sintering temperature, °C	Brand of the metal-catalyst			
		Nickel	Cobalt	Iron	Copper
		Equivalent stress, GPa			
Ceramic	400	1,53	1,34	1,24	1,78
	700	2,76	2,41	2,23	3,20
Titanium-magnesium	400	1,53	1,16	1,02	1,82
	700	2,76	2,09	1,84	3,27
Aluminium	400	1,52	1,32	1,19	1,79
	700	2,74	2,38	2,14	3,23

The influence of the percentage of the metal phase on the integrity retention of diamond grain has been studied with the aid of new 3D model "bond – metal phase – grain" with 20 % content of the metal-catalyst in diamond grain AC65. Proceeding from the gained results, it is argued that the increase of metal phase percentage in synthetic diamonds leads to higher value of equivalent stress in grain. The role of width and the material of diamond grain coatings (copper, molybdenum, sodium-borosilicate glass) is studied and positive influence of the coatings on diamond grain integrity retention at fabrication stage of diamond wheel is confirmed (fig. 5).

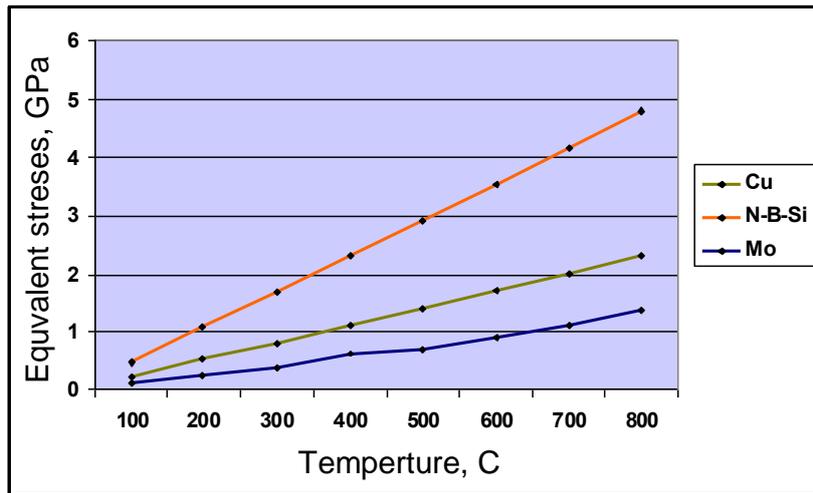


Figure 5 – Dynamics of stress rise in system "grain – metal phase – coating – bond" with diamond grain AC100; width of coating 15  $\mu\text{m}$

Process of exploitation of diamond grinding wheels has been simulated at the second stage of researches. Influence of metal phase presence in synthetic diamonds at abrasive and single-point machining is studied. Maximal values of equivalent stress are defined at increase in force of hold-down pressure of grinding wheel and at increase in temperature in cutting area.

Simulation of grinding process was carried out according to the similar technique indicated in the first part of the paper. Software products SolidWorks and CosmosWorks were used. 3D model "bond – grain – metal phase – material to be machined" has been developed. The ceramic bond, cobalt metal phase (5 % of diamond grain volume), diamond grain and workpiece from aluminium have been used in the initial model. Workpiece and a fragment of the bond were represented as plates, and diamond as a fragment with octahedron geometry. During calculated experiment the model was loaded with normal force from 0,5 to 4 N, that modelled force of hold-down pressure of diamond grinding wheel during abrasive processing (fig. 6).

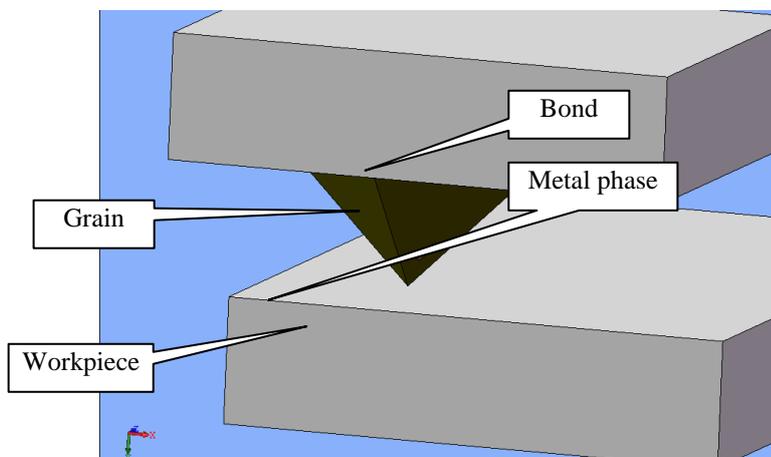


Figure 6 – 3D model "bond – grain – metal phase – workpiece" with finite-element mesh

Significant influence of temperature in cutting area on the deflected mode of diamond grain is defined. This phenomenon is explainable by the influence of temperature factor on behaviour of metal-catalyst in diamond grain. So, already at the temperature 500 °C and force of hold-down pressure 1 N there can be loads by 5 % exceeding maximal value of stress without presence of heightened temperature. Metal-catalyst has considerably greater coefficient of thermal expansion as compared with diamond, and at increase in stress there is superposition of stress fields caused by force and temperature loads (fig. 7).

*Conclusion and further prospects.* Theoretical study of 3D deflected mode of the system "material to be machined– grain— metal phase – bond" in problem-oriented software package CosmosWorks has allowed to examine influence of qualitative composition of metal phase on 3D deflected mode of grinding area at high temperature, and also to calculate equivalent stress in examined system. The obtained results are evidence of application expediency of diamond grains with minimum possible contents of metal phase, and dominating element in its composition should be a metal with a low coefficient of thermal expansion. It allows to considerably increase coefficient of utilization of diamond grains and to increase profitability of diamond grinding.

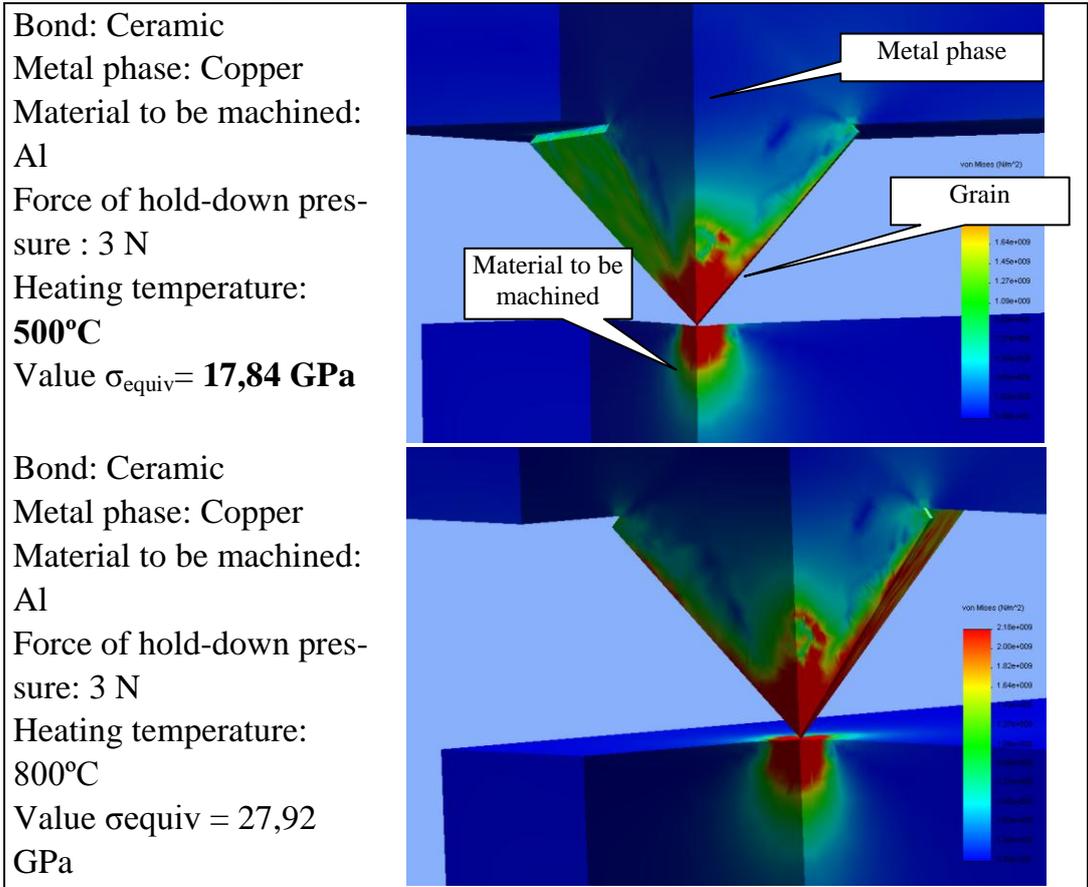


Figure 7 – Stress distribution at increase in temperature of diamond grain

**References:** **1.** *Heisel U, Krivoruchko DV, Zaloha VA, Storchak M* (2007) Cause Analysis of Errors in FE Prediction Orthogonal Cutting Performances. Proceedings of the 10th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations. Calabria 141–148. **2.** *Makarov VF, Chigodaev NE, Tokarev DI* (2007) Research of Influence of Process of Plastic Formation of Burrs on Destruction of the Hard-Alloy Broaches. Proceedings of the 10th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations. 97–102. **3.** *Rizzutti S, Umbrello D, M'Saoubi R, Outeiro JC* (2007) Modelling and Validation of Tool Wear During Hard Machining of AISI H13 Tool Steel. Proceedings of the 10th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations. 293–300. **4.** *Ivester RW, Whitenton E, Heigel J* (2007) Measuring Chip Segmentation by High-Speed Microvideography and Comparison to Finite-Element Modelling Simulations. Proceedings of the 10<sup>th</sup> CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations. 37–44. **5.** *Fischer C* (2007) Runtime and Accuracy Issues in Three Dimensional Finite Element Simulation of Machining Proceedings of the 10th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations. 45–50. **6.** *Marusich TD, Usui S, Stephenson DA* (2007) Finite Element Modelling of Drilling Processes with Solid and Indexable Tooling in Metals and Stack-ups. Proceedings of the 10th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations. 51–58. **7.** *Denkena B, de Leon Garcia L, Köhler J* (2007) FEM-Simulation of High-Performance-Milling. Proceedings of the 10th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations. 149–156. **8.** *Dix M, Leopold J, Neugebauer R* (2007) Investigations on the Influence of Local Material Properties of Burr Formation. Proceedings of the 10th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations. 133–140. **9.** *Semko MF, Grabchenko AI, Khodorevskiy MG* (1980) Diamond Grinding of Synthetic Superhard Materials. Book, Kharkov, 192 p. **10.** *Fedorovich VA* (2002) Elaboration of scientific fundamentals and methods of practical realization of adaptability control at diamond grinding of superhard materials: Thesis, Doct. Techn. Sc.: 05.03.01. Kharkov, 469 p. **11.** *Gargin VG* (1983) Influence of Inclusions in Diamonds on the Strength. Superhard Materials 4: 27-30. **12.** *Kozakova NV* (2004) Estimation of Reasonable Performances of Diamond Wheels by Means of 3D Simulation of Manufacturing Processes and Grinding of Superhard Materials: Abstract of PhD thesis. Kharkov, 23 p. **13.** *Voronin GA, Mal'nev VI, Nevstruev GF* (1984) Influence of Inclusions on Strength of Synthetic Diamonds at High Temperature. Superhard Materials 2: 33-37. **14.** *Novikov NV, Maistrenko AL, Kulakivskiy VN* (1993) Fracture Strength of Superhard Composite Materials. Book, Kiev: Scientific Idea, 220 p.

**Г.А. ОБОРСКИЙ**, д-р техн. наук, **О.С. САВЕЛЬЕВА**, канд. техн. наук,  
**Н.А. КОТЕНКО**, Одесса, Украина

## **ИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО СТРУКТУРНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ МАРКОВСКИХ ПРОЦЕССОВ**

Робота присвячена створенню інформаційної системи підтримки прийняття рішень в САПР і АСУ, заснованої на синергетичному об'єднанні можливостей різних видів марковських моделей складних динамічних систем з резервуванням: емпіричної, напівмарковської та морфологічної. Емпірико-статистична модель оцінює ушкодження, що відбулися в об'єкті при його стендових і полігонних випробуваннях, напівмарковська модель створюється для моделювання дискретних об'єктів у неперервному часі і, нарешті, морфологічні марковські моделі застосовуються для ідентифікації станів складних систем.

Работа посвящена созданию информационной системы поддержки принятия решений в САПР и АСУ, основанной на синергетическом объединении возможностей различных видов марковских моделей сложных динамических систем с резервированием: эмпирической, полумарковской и морфологической. Эмпирико-статистическая модель оценивает повреждения, произошедшие в объекте при его стендовых и полигонных испытаниях, полумарковская модель создается для моделирования дискретных объектов в непрерывном времени и, наконец, морфологические марковские модели применяются для идентификации состояний сложных систем.

*G.A. OBORSKIJ, O.S. SAVEL'EVA, N.A. KOTENKO*  
*INFORMATION SUPPORT OF THE AUTOMATED STRUCTURAL DESIGNING*  
*MARKOVIAN PROCESSES*

The work is devoted to the creation support of decision-making in CAD and CAM information system, based on the synergetic association of different markov models of difficult dynamic systems with reservation possibilities: empirical, semimarkov and morphological. The empirico-statistical model estimates the damages which have occurred in object at its bench and polygon tests, semimarkov the model is created for modeling of discrete objects in continuous time and, at last, morphological markov models are applied to identification of conditions of difficult systems.

Основное понятие синергетики – определение структуры как состояния, возникающего в результате многовариантного и неоднозначного поведения таких многоэлементных структур или многофакторных сред, которые не деградируют к стандартному для замкнутых систем усреднению термодинамического типа, а развиваются вследствие открытости, притока энергии извне, нелинейности внутренних процессов, появления особых режимов с обострением и наличия более одного устойчивого состояния.

При рассмотрении марковского процесса как модели «поведения» таких структур исследователи сталкиваются с многими проблемами, решение которых может быть найдено на пути взаимодействия марковских моделей различных видов, так как, в соответствии с принципами синергетики, когда нелинейные динамические системы объединяются, новое образование не равно сумме частей, а образует систему другой организации или системе иного уровня.

Главная проблема моделирования марковских процессов заключается в том, что количество состояний моделирующей системы и возможных переходов быстро возрастает с ростом количества элементов в ней. Кроме того, существующие виды марковских моделей не позволяют сочетать стохастическую основу такого подхода с вполне детерминированными событиями, происходящими при реальной эксплуатации конкретных технических объектов.

Одним из действенных методов повышения надежности ответственных объектов является структурное резервирование – введение дополнительных резервных элементов структуры, которые при абсолютной надежности элементов исходной системы не являются функционально необходимыми [1].

Моделирование жизненного цикла (ЖЦ) таких объектов удобнее всего осуществлять с помощью методов марковского анализа, использующих диаграмму состояний и переходов и моделирующих аспекты надежности поведения системы во времени. Главным преимуществом применения таких методов является то, что они позволяют легко моделировать многочисленные стратегии технического обслуживания. Кроме того, в марковской модели можно отразить порядок, в котором происходят многократные отказы. К сожалению, другие методы анализа надежности не всегда позволяют учесть сложные стратегии технического обслуживания [2].

Марковская система рассматривается как набор элементов, каждый из которых может существовать только в одном из двух состояний: неработоспособном или работоспособном. Структурный анализ марковских систем основывается на том предположении, что система в целом может существовать в различных состояниях, каждое из которых определяется специфической комбинацией работоспособного и неработоспособного состояний ее элементов [3, 4]. В случайный момент отказа или восстановления хотя бы одного элемента вся система может перейти из одного состояния в следующее по времени. Важнейшим компонентом такого анализа является *прогноз повреждений структуры*, представляющий собой «расписание» будущих отказов отдельных элементов резервируемых систем. Прогнозирующая модель должна, при этом, содержать две основные под-

модели: подмодель *прогноза повреждений структуры* проектируемых (управляемых) объектов на протяжении их жизненных циклов (ЖЦ) и подмодель *численной оценки критериев надежности* этих объектов [5, 6].

Существует много видов марковских моделей, часть которых наиболее подходит для прогнозирования и оценки надежности.

В частности, именно для этих целей создавалась *эмпирико-статистическая (ЭС) модель*, работа которой построена на непосредственной оценке повреждений, произошедших в объекте при его стендовых и полигонных испытаниях [7]. Обладая большим «практическим опытом» прогнозирования поэлементных повреждений, такая модель, к сожалению, не может оценить текущее состояние объекта в целом, тем более, идентифицировать его отказ.

*Полумарковские (ПМ) модели* созданы для моделирования дискретных объектов в непрерывном времени [8, 9], однако для их обучения необходима информация, полученная при практических испытаниях объекта моделирования, что не всегда удобно, особенно, на этапе проектирования объекта.

И, наконец, *морфологические (МО) марковские модели* применимы в идентификации состояний сложных систем, но малопригодны для моделирования ЖЦ реальных объектов [6].

Таким образом, марковские модели являются универсальным средством для изучения и прогнозирования многих динамических процессов. Однако реальное применение этого средства во многих случаях ограничивается отсутствием информации о поведенческих тенденциях в развитии соответствующих динамических систем, а также действенных и, главное, быстроработающих методов идентификации отказов и интегральной оценки надежности предлагаемых технических решений, необходимых как при проектировании, так и при управлении сложными резервированными объектами.

Целью настоящей работы является создание информационной системы поддержки принятия решений в САПР и АСУ, основанной на синергетическом объединении возможностей различного вида марковских моделей сложных динамических систем с резервированием, в основном, в области техники.

Рассмотрим структуру сложного объекта в виде  $n$  отдельных взаимозависимых элементов. Если система приняла состояние  $z$ , то она проводит в нем некоторое время, вообще говоря, случайное, а затем вследствие отказа или восстановления какого-либо элемента «скачкообразно» переходит в новое состояние. Таким образом, в этом случае все реализации фазового процесса  $\{Z(t)\}$  являются *кусочно-постоянными*.

Будем считать также связи абсолютно надежными, а элементы такими, которые могут находиться только в двух состояниях: исправном и неисправном. Примем также, что система поглощающая, т.е. отказавшие узлы не восстанавливаются и дальнейшие переходы из них невозможны [3].

Главной особенностью прогнозирования эксплуатации таких систем с резервированием является то, что на всех итерациях ЖЦ, кроме последнего, суммарное повреждение не приводит к отказу, а значит, перед моделью возникает проблема «назначения» некоторой совокупности поврежденных на каждой такой итерации. Естественно предположить, что в реальной жизни накопление повреждений носит стохастический характер: не бывает двух совершенно одинаковых объектов (особенности изготовления), одинаковых условий их работы (особенности эксплуатации) и одинаковых случайностей, подстерегающих объекты.

Рассмотрим простой пример. Пусть в качестве объекта представлена некоторая система, структура которой состоит из  $n = 7$  элементов. Исходное состояние системы – момент  $i$  – характеризуется их исправностью (рис. 1).

Совокупность переходов на графе возможных состояний объекта в процессе его эксплуатации представляет собой множество вариантов изменения состояний системы на одной итерации ЖЦ (рис. 1).

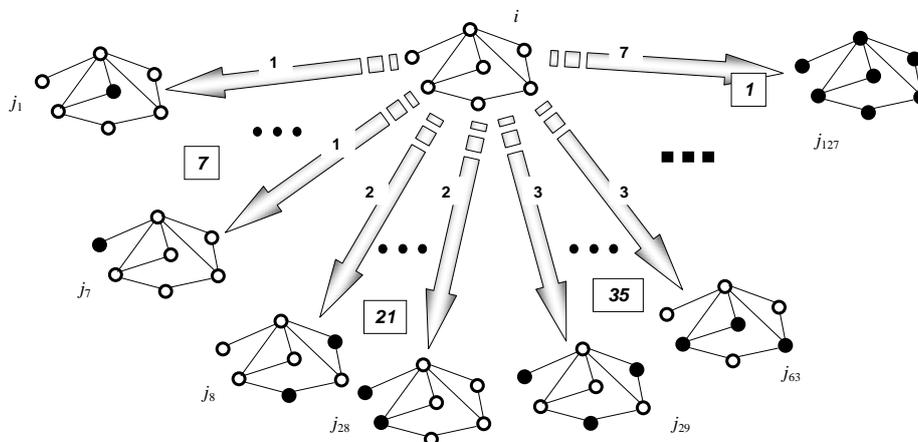


Рисунок 1 – Схема 127 возможных переходов семиузловой системы из состояния  $i$  в новое состояние  $j$  на одной итерации ЖЦ

Мощность этого множества, даже для относительно простых объектов, чрезвычайно велика. Так, в нашем примере только на первой итерации переход к моменту  $j$  может быть реализован 127 способами:

$$S_7 = C_7^1 + C_7^2 + C_7^3 + C_7^4 + C_7^5 + C_7^6 + C_7^7 = 127. \quad (1)$$

Общее количество вариантов быстро растет при увеличении  $n$ . Так как система имеет избыточную структуру, часть  $S_n$  отк этих переходов приводит к отказу системы в целом, а часть  $S_n$  испр – нет. Очевидно, что

$$S_{n \text{ отк}} + S_{n \text{ испр}} = S_n. \quad (2)$$

На рассматриваемом в нашем примере этапе ЖЦ системы в любой момент времени состояние  $i$  может перейти в состояние  $j$ , при этом может произойти отказ любого сочетания из семи элементов по 1, 2, ..., 6 (переходы  $ij_1 - ij_{126}$ ) и, наконец, могут отказаться все элементы (переход  $ij_{127}$ ). Каждый из переходов от  $i$  к  $j_1 \dots j_{127}$ , соответственно, характеризуется вероятностями  $p_1 \dots p_{127}$ , значения которых определяются тремя группами факторов:

- внутренними свойствами системы (конструкцией элементов и связей, технологическими переходами и пр.);
- условиями внешней среды (механические нагрузки, температурное воздействие и пр.);
- непредвиденными случайными воздействиями, источники которых находятся как внутри, так и вне системы.

Здесь возникают *первая и вторая задачи*: определить вероятности  $p_1 \dots p_{127}$  и статистические характеристики времени наступления переходов  $\tau_{ji}$  для реальной системы, работающей в реальных условиях эксплуатации. Эти задачи решаются в результате комплексного применения ЭС и ПМ моделей.

В случае выхода системы из очередной итерации в работоспособном состоянии моделирование может быть продолжено от выбранного «корня» (рис. 2). Выбор может быть обоснован рядом причин и необязательно отвечать наиболее вероятному переходу.

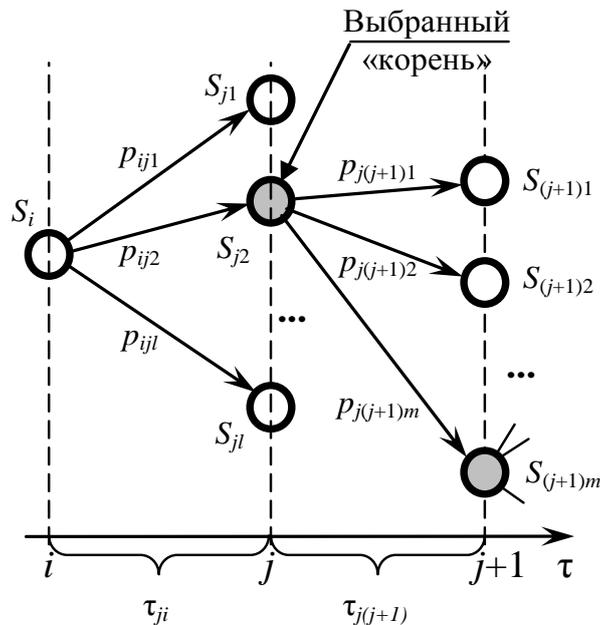


Рисунок 2 – Схема возможных движений системы по итерациям жизненного цикла

Поэтому, в рамках решения *третьей задачи* на каждой итерации моделирования ЖЦ необходимо выбрать один путь среди  $S_n$  испр возможных, причем эта величина определяется количеством элементов и характером последних. Фактически, именно здесь решается вопрос о выборе «корня» дальнейшей эволюции, т.к. она может быть продолжена от любого состояния из подмножества  $S_n$  испр, а мощность этого подмножества, особенно на начальных стадиях ЖЦ резервированных систем, мало отличается от мощности множества  $S_n$ .

Эта задача решаются в результате комплексного применения ПМ и МО моделей. Аналогичные рассуждения можно применять ко всем другим переходам ЖЦ системы:  $j \rightarrow (j+1)$ ;  $(j+1) \rightarrow (j+2)$  и т.д., сохраняющим работоспособность системы в целом. *Четвертая задача* заключается в идентификации отказа на последовательных позициях эволюции системы. Эти задачи решаются в результате комплексного применения ЭС и МО моделей.

И, наконец, интегральная оценка надежности объекта осуществляется в рамках решения *пятой задачи*. Для этого используется МО модель (см. табл.), основанная на вычислении энтропийного критерия надежности

$$K = - \sum_{i=n_1+1}^{n_2-1} [ p_i \log_2 p_i + 1 - p_i \log_2 1 - p_i ], \quad (3)$$

где  $p_i$  – вероятность отказа системы после повреждения  $n$  ее элементов.

Использование энтропии для оценки и сравнения сложных технических систем, «поведение» которых имеет признаки стохастичности, приобретает все большее распространение [10].

В нашем случае она дает возможность при диагностике оценить техническое состояние системы одним числом, играющим во многих случаях главную роль, например, при необходимости быстрого подбора варианта конструкции в САПР или варианта структурной перестройки системы в управлении.

Таблица – Использование марковских моделей различных типов для решения задач информационной поддержки структурного проектирования и управления

№	Содержание задачи	Применяемые модели		
		ЭС	ПМ	МО
1	Определение вероятностей переходов	+	+	–
2	Определение времени переходов	+	+	–
3	Выбор «корня» последующего перехода	–	+	+
4	Идентификация отказа	+	–	+
5	Интегральная оценка надежности	–	–	+

Таким образом, в работе решена проблема информационной поддержки прогнозирования структурной надежности сложных резервированных технических систем путем комплексного применения марковских моделей различных типов. Такая система поддержки принятия решений способна эффективно функционировать как в рамках САПР, так и при структурном управлении.

**Список использованных источников:** 1. *Острейковский В.А.* Теория надежности. – М.: Высшая школа, 2003. – 408 с. 2. *Князева Е. Н.* Законы эволюции и самоорганизации сложных систем / *Е.Н. Князева, С.П.Курдюмов.* – М.: Наука, 1994. – 236 с. 3. *Байхельт Ф.* Надежность и техническое обслуживание. Математический подход / *Ф. Байхельт, П. Франклин.* – М.: Радио и связь, 1988. – 392. 4. Application of Markov techniques. – The International Standard IEC 61165 (1995-01). – 45 p. 5. *Становский А.Л.* Моделирование надежности компьютерных сетей / *А.Л. Становский, О.Е. Плачинда, И.Л. Стадник* // Зб. наук. праць Одесько інституту сухопутних військ. – 2006. – № 12. – С. 115 – 117. 6. *Становский А.Л.* Моделирование отказоустойчивости в САПР сложных технических систем / *А.Л. Становский, В.М. Тонконогий, О.С. Савельева, О.Е. Плачинда* // Резание и инструмент в технологических системах. – 2007. – Вып. 73. – С. 290 – 295. 7. *Балан С.А.* Статистические методы прогнозирования жизненного цикла сложных восстанавливаемых технических систем / *С.А. Балан, А.Л. Становский, Халиль Ягхи* // Труды Одесского политехнического университета. – Одесса. – 2000. – Вып. 3. – С. 95 – 98. 8. *Дышин О.А.* Полумарковские модели управления рисками в магистральных газонефтепроводных системах / *О.А. Дышин, И.А. Азизов* // Электронное моделирование. – 2010. – Т. 32. – № 2. – С. 15 – 30. 9. *Рыков В.В.* Регенерирующие процессы с несколькими типами точек регенерации / *В.В. Рыков, М.А. Ястребенецкий* // Большие системы. Массовое обслуживание. Надежность. – М.: Наука, 1970. – С. 203 – 208. 10. *Хазен А.М.* Введение меры информации в аксиоматическую базу механики. М.: РАУБ, 1998. – 324 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. *Ostrejkovskij V.A.* Teorija nadezhnosti. – M.: Vysshaja shkola, 2003. – 408 s. 2. *Knjazeva E. N.* Zakony jevoljucii i samoorganizacii slozhnyh sistem / *E.N. Knjazeva, S.P.Kurdjumov.* – M.: Nauka, 1994. – 236 s. 3. *Bajhel't F.* Nadezhnost' i tehničeskoe obslužhivanie. Matematičeskij podhod / *F. Bajhel't, P. Franklin.* – M.: Radio i svjaz', 1988. – 392. 4. Application of Markov techniques. – The International Standard IEC 61165 (1995-01). – 45 p. 5. *Stanovskij A.L.* Modelirovanie nadezhnosti komp'juternyh setej / *A.L. Stanovskij, O.E. Plachinda, I.L. Stadnik* // Zb. nauk. prac' Odes'ko institutu suhoputnih vijs'k. – 2006. – № 12. – S. 115 – 117. 6. *Stanovskij A.L.* Modelirovanie otkazoustojchivosti v SAPR slozhnyh tehničeskijh sistem / *A.L. Stanovskij, V.M. Tonkonogij, O.S. Savel'eva, O.E. Plachinda* // Rezanie i instrument v tehnologičeskijh sistemah. – 2007. – Vyp. 73. – S. 290 – 295. 7. *Balan S.A.* Statističeskije metody prognozirovanija zhiznennogo cikla slozhnyh vosstanavlivaemyh tehničeskijh sistem / *S.A. Balan, A.L. Stanovskij, Halil' Jaghi* // Trudy Odessko-go politehničeskogo universiteta. – Odessa. – 2000. – Vyp. 3. – S. 95 – 98. 8. *Dyshin O.A.* Polumarkovskie modeli upravlenija riskami v magistral'nyh gazoneftetrubovodnyh sistemah / *O.A. Dyshin, I.A. Azizov* // Jelektronnoe modelirovanie. – 2010. – T. 32. – № 2. – S. 15 – 30. 9. *Rykov V.V.* Regenerirujuwie processy s neskol'kimi ti-pami tocek regeneracii / *V.V. Rykov, M.A. Jastrebeneckij* // Bol'shie sistemy. Masso-voe obslužhivanie. Nadezhnost'. – M.: Nauka, 1970. – S. 203 – 208. 10. *Hazen A.M.* Vve-denie mery informacii v aksiomatičeskiju bazu mehaniki. M.: RAUB, 1998. – 324 s.

**О.А. РОЗЕНБЕРГ**, д-р техн. наук, **В.В. ВОЗНЫЙ**, канд. техн. наук,  
**С.В. СОХАНЬ**, д-р техн. наук, Киев, Украина  
**Й. ГАВЛИК**, д-р техн. наук, Краков, Польша

## **ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ БИОСОВМЕСТИМЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ И МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ**

З метою визначення оптимуму біологічно сумісних матеріалів для пари тертя Хірулен-матеріал що до великих суглобів людини досліджені сучасні, керамічні та металеві матеріали медичного призначення. У результаті проведення трибологічних досліджень показана можливість їх застосування як матеріалу для виготовлення пар тертя в ендопротзах суглобів людини.

С целью определения оптимума биологически совместимых материалов для пары трения Хирулен-материал применительно к крупным суставам человека исследованы современные, керамические и металлические материалы медицинского назначения. В результате проведения трибологических исследований показана возможность их применения в качестве материала для изготовления пар трения в эндопротзах суставов человека

**О.А. ROZENBERG, V.V. VOZNYJ, S.V. SOHAN', J. GAVLIK**  
*FRICITIONAL FEATURES OF WORK OF BIOCOMPATIBLE CERAMIC AND METAL MATERIALS*

For the purpose of sampling of optimum biologically compatible material for a pair of a friction the Hirulen-material with reference to hip-joint of the person have been explored crystalline, ceramic and metal a material. Possibility of application of the specified materials is shown, the priority materials and complexities related to their use are spotted.

Эндопротезирование суставов на сегодняшний день является наиболее прогрессивным методом хирургического лечения поражений суставов разной этиологии, который быстро развивается и находит все большее применение в ортопедической практике.

Статистика разных стран мира свидетельствует, что в среднем ежегодно в протезировании нуждаются 500 – 1000 больных и травмированных на 1 млн. населения, то есть с учетом населения Украины, ежегодно в нашей стране нуждаются в протезировании 25 – 40 тысяч больных. На сегодняшний день в Украине выполняется в 10 раз меньше прогнозированного количества эндопротезирований суставов [1].

На сегодняшний день пары трения для производства эндопротезов тазобедренного сустава человека изготавливаются из керамических и металлических материалов, а так же полиэтилена Хирулен или Кросслинк. Эндопротезы тазобедренного сустава человека с парой трения металл (Co-Cr-Mo)–полиэтилен являются наиболее распространенные и занимают более 50% от общего объема производимых в мире. Кроме того, для людей в возрасте более 70 лет, пары трения металл-полиэтилен применяются практически в 100% случаях. Однако статистические данные исследований работы пары металл-полиэтилен показывают, что износ происходит в пределах до 5 - 10 мкм в год.

С одной стороны ресурс работы данной пары позволяет полноценно жить несколько лет, но в ряде случаев данного временного периода бывает недостаточно. Поэтому является актуальными применение новых металлических и керамических материалов в паре с полиэтиленом.

Сегодня отечественными материаловедами разработана широкая гамма материалов как металлических, керамических так и кристаллических медицинского назначения обладающих биологической инертностью. К таким материалам относятся (табл. 1.)

Таблица 1 – Свойства биосовместимых материалов

	Sapphire	ZrO <sub>2</sub> -ceramic (IPMS)	ZrO <sub>2</sub> -ceramic (DonFTI)	Nano-Ti	Nano-Ti с азотированием поверхности
Прочность при изгибе	>400 МПа	>800 МПа	850 МПа	–	
Прочность при растяжении	–	–	–	840 МПа	
Предел текучести	–	–	–	760 МПа	
Коэффициент трещиностойкости, K <sub>IC</sub>	3.5 МПа·м <sup>-1/2</sup>	>7–9 МПа·м <sup>-1/2</sup>	8–11 МПа·м <sup>-1/2</sup>	–	
Модуль Юнга	400 GPa	200 GPa	209 GPa	102.6–111.7 GPa	
Содержание тетрагональной фазы	–	>98 %	100 %	–	
Плотность	3.99 g/cm <sup>3</sup>	6.01–6.02g/cm <sup>3</sup>	6.03–6.05g/cm <sup>3</sup>	4.505 g/cm <sup>3</sup>	
Общая пористость	0	0	0	–	
Открытая пористость	0	0	0	–	
Микротвердость	19.4–22 GPa	10–12 GPa	10–12 GPa	2550–2730 МПа	7900–8900 МПа
Содержание Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	–	3 %	3 %	–	
Обработка в автоклаве	–	Возможна		–	

Для изучения трибологических свойств биосовместимых керамических, кристаллических и металлических материалов, в Польском городе Радом (Институт трибологии и эксплуатации), под руководством д.т.н., проф. Щерака М. проведены трибологические испытания пар трения с различным их сочетанием (керамика-керамика, керамика –металл, керамика сапфир, сапфир-металл, сапфир-сапфир, металл-металл) и определены коэффициенты трения пар по схеме вращающийся шар-диск (экспресс метод для сопоставления материалов между собой). Следующим этапом считаем проведение долгосрочных исследований пар трения по схеме возвратно-поступательного движения цилиндра по пластине и в завершение симмуляционные исследования работы шарнира тазобедренного сустава.

На данном этапе исследований определяли коэффициенты трения пар хирулен-сапфир, хирулен-диоксид циркония, хирулен-Виталиум (сплав системы Co-Cr-Mo) по схеме возвратно-поступательного движения цилиндра по пластине. Для проведения указанных испытаний были изготовлены образцы, приведенные на рис. 1. Цилиндр изготавливали из хирулена, а плитку из диоксида циркония, искусственного сапфира, Виталиума (сплав системы Co-Cr-Mo).

Трибологические испытания проводили на установке Т-17 (рис. 2) с условиями проведения [2]:

Амплитуда возвратно-поступательного движения	12.5 мм
Нагрузка	225 Н
Частота движения	1 цикл/сек
Рабочая жидкость	раствор Рингера
Предел проведения испытаний	$1 \times 10^6$ циклов
Температура проведения испытаний	37 °С
Интервал регистрации данных	$5 \times 10^4$ циклов

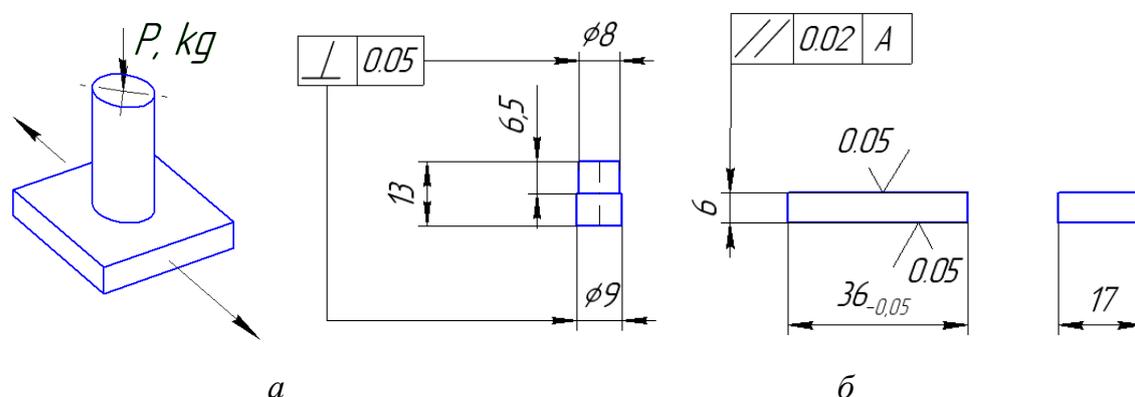


Рисунок 1 – Схема трибологических испытаний – а, и размеры деталей для проведения исследований – б

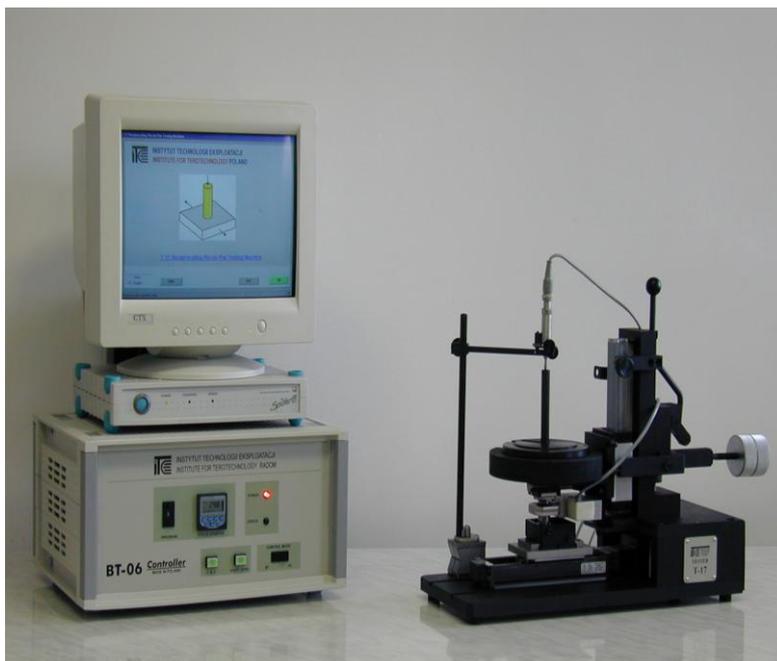


Рисунок 2 – Установка для проведения трибологических испытаний Т-17

В процессе проведения исследований контролировали следующие параметры процесса изнашивания пары трения:

- Линейный износ пары;
- Рабочая среда – р-р. Рингера (табл. 2.);
- Температура процесса (поддерживали постоянную температуру процесса изнашивания  $\square 37 \square \text{C}$ );
- Сила трения;
- Количество циклов.

Таблица 2 – Состав используемого раствора Рингера

No.	Компоненты раствора рингера	Концентрация [г/л]
1	NaCl	0,75
2	CaCl <sub>2</sub>	0,125
3	KCl	0,0075
4	NaHCO <sub>3</sub>	0,0125
pH=7,0		

Для анализа пары трения проводили два повтора эксперимента, в случае отклонения показаний фиксируемых данных работы пары проводили третий повтор.

В результате проведения трибологических исследований гаммы биосовместимых материалов на машине трения Т-17 были получены следующие зависимости:

- зависимость коэффициента трения от количества циклов работы пары трения (рис. 3);
- зависимость линейного износа пар трения от времени работы от количества циклов работы пары трения (рис. 4);
- математическая обработка полученных результатов (рис. 5, 6)

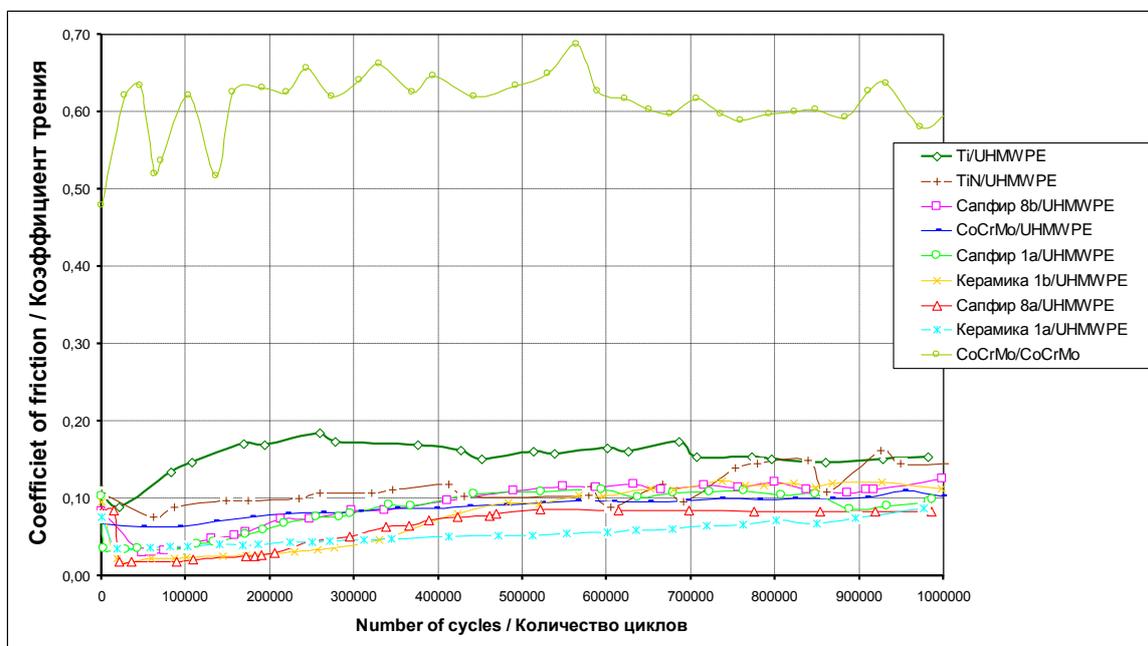


Рисунок 3 – Экспериментальные кривые изменения коэффициента трения пар скольжения за 1 млн. циклов

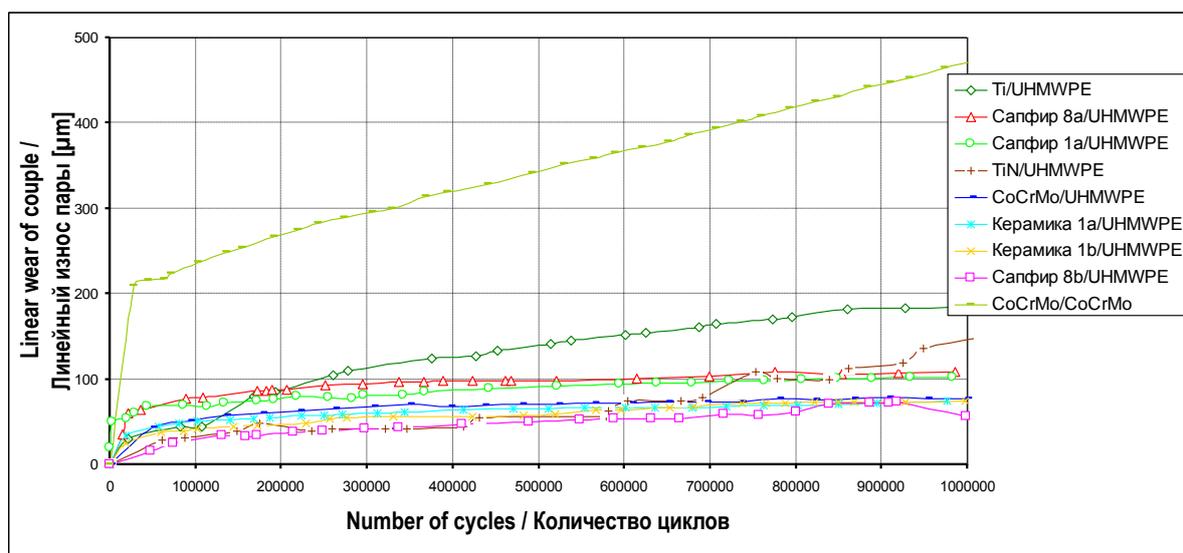


Рисунок 4 – Экспериментальные кривые изменения линейного износа пар скольжения за 1 млн. циклов

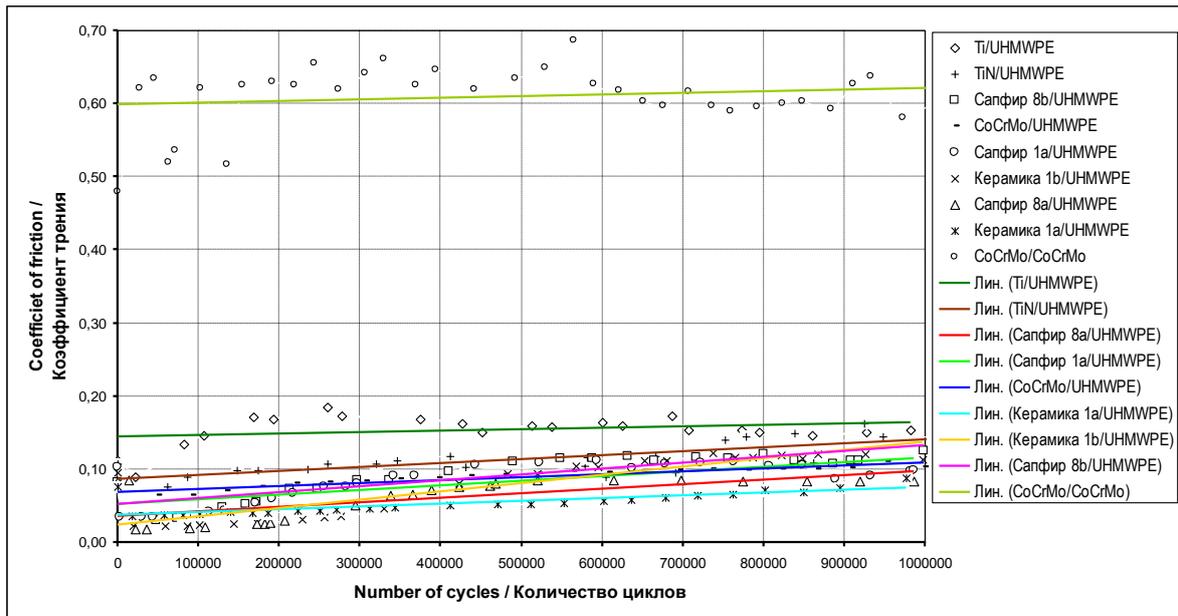


Рисунок 5 – Линейная аппроксимация кривых изменения коэффициента трения за 1 млн. циклов

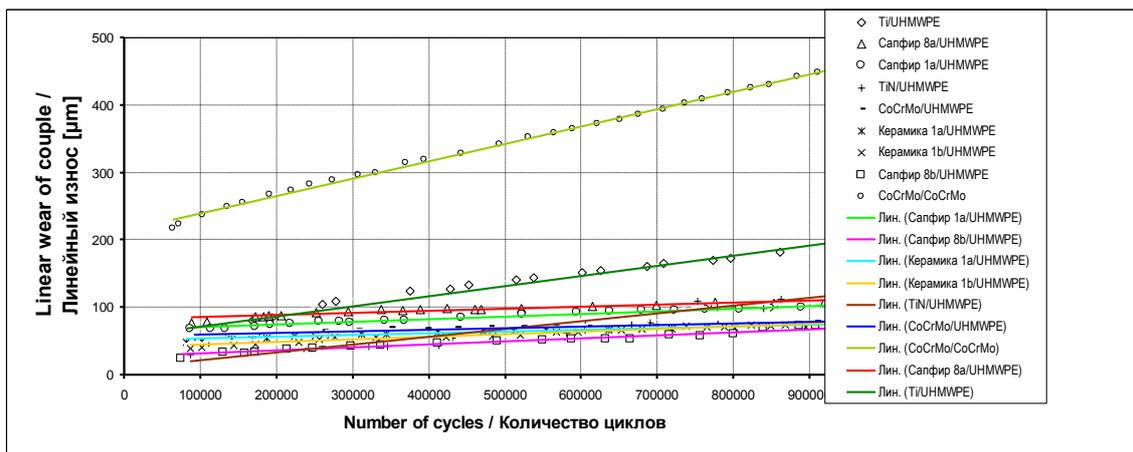


Рисунок 6 – Линейная аппроксимация кривых изменения линейного износа за 1 млн. циклов

Из анализа приведенных графиков видно, что:

- Наименьшие значения линейного износа UHMWPE демонстрирует сапфир 8b при уровне коэффициента трения этой пары, сопоставимом с коэффициентом трения пары сплав Со-Сr-Мо/UHMWPE.
- Линейный износ UHMWPE в парах с сапфиром 1a, 8a выше, чем у сплава Со-Сr-Мо, а уровень коэффициента трения у пары с керамикой 8a стабильно ниже, чем у пары со сплавом Со-Сr-Мо.
- Линейный износ UHMWPE в парах трения с  $ZrO_2$ -керамикой обоих видов несколько ниже, чем у сплава Со-Сr-Мо, а коэффициент трения у пары с керамикой 1a на 0,04 ед. ниже, чем у пары со сплавом СоCrMo.

- Среднее значение линейного износа пары трения с UHMWPE за 1 млн. циклов у наноструктурного титана с азотированием поверхности сопоставимо с этим показателем у сплава Co-Cr-Mo, однако темп его возрастания за тот же период времени в 6 раз выше. При этом коэффициент трения у пары с nano-Ti на 0,025–0,03 ед. выше, чем у пары со сплавом Co-Cr-Mo, и темп его возрастания несколько выше.
- Темп возрастания линейного износа пары трения nano-Ti/UHMWPE на порядок выше, чем у пары сплав Co-Cr-Mo/UHMWPE. Коэффициент трения у пары с nano-Ti на 0,07 ед. выше, чем у пары со сплавом Co-Cr-Mo.

Более детальный анализ указанных выше результатов исследований и их интерпретация с учетом состояния обработанной поверхности до и после процесса трибологических испытаний дает возможность утверждать, что большое влияние на работоспособность пары оказывает качественное и количественное состояние обработанной поверхности. То есть отклонение от формы (плоскостности), наличие карманов для смазывания и скопления продуктов износа, шероховатость поверхности может, как увеличить ресурс работы, так и резко его снизить.

Из рисунка 10а, 10б видно, что испытания проводили на пластинках имеющих одинаковую шероховатость, но на одной из них явно видны следы предшествующей полировке – шлифовки (рис. 10а). Как видно из рисунков 10в и 10г шероховатости данных образцов практически не отличаются  $Sa = 0.0276$  мкм и  $Sa = 0.0233$  мкм.

Следует отметить, что на результаты проведенных трибологических исследований в значительной мере оказывают, как механическая обработка, дефекты приповерхностного слоя, качество обработанной поверхности, адгезия на поверхности образцов и т.д.

Так рабочие поверхности образцов обрабатывались методом свободной притирки на доводочных станках алмазными пастами марок АСМ 28/20, 20/14, 5/3.

После механической обработки поверхность исследовали при помощи атомно-силового микроскопа модели AFM Q-Scope 250.

При измерении характеристик обработанной поверхности следует учитывать большую дискретность проведенных измерений, а именно измерение на этом микроскопе происходит на площади поверхности размерами  $20 \times 20$  мкм (рис. 7.).

Как видно из рисунка 7. четко видны следы финишной алмазной обработки поверхности. Тем не менее, возможности атомно-силового микро-

скопа модели AFM Q-Scope 250 не дают возможности зафиксировать ни глубоких царапин, ни их размеров. Измерение характеристик обработанной поверхности следует проводить только как контрольную проверку полученных данных (на заранее выбранном участке) с помощью других приборов для регистрации данных.

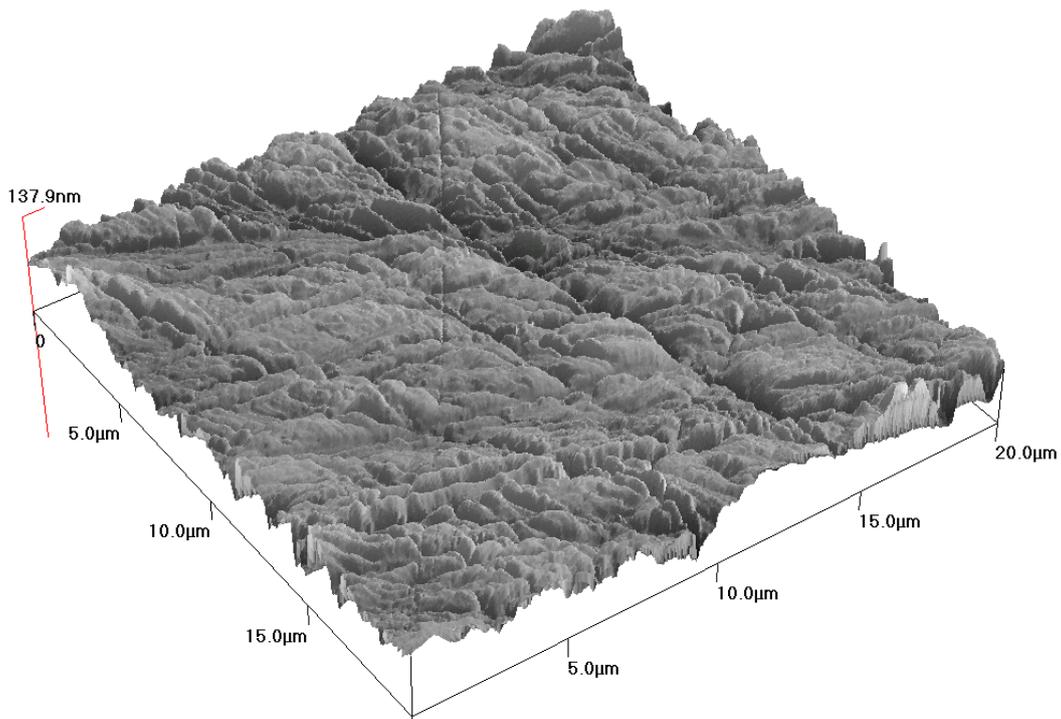


Рисунок 7 – Профиль поверхности керамического образца полученный с помощью атомно-силового микроскопа модели AFM Q-Scope 250 фирмы Quesant Instrument Corporation в сотрудничестве с Schaefer Technologie Gmb

Для оценки технологического процесса механической обработки проводили микроанализ поверхности. В результате микроанализа полированной поверхности биосовместимой керамики на основе диоксида циркония и сапфира установлено, что шаржирование алмазных частиц в обработанную поверхность не происходит (рис. 8.).

Результаты получены на сканирующем электронном микроскопе модели S 2460N фирмы Hitachi. В случае наличия дефектов изготовления керамического материала, которые выходят на поверхность, вследствие его механической обработки возможно забивание алмазными абразивными частицами (рис. 9.). Это связано с дефектами материала, которые вскрываются во время обработки материала. Причиной возникновения этих дефектов является предыдущая перед механической обработка.

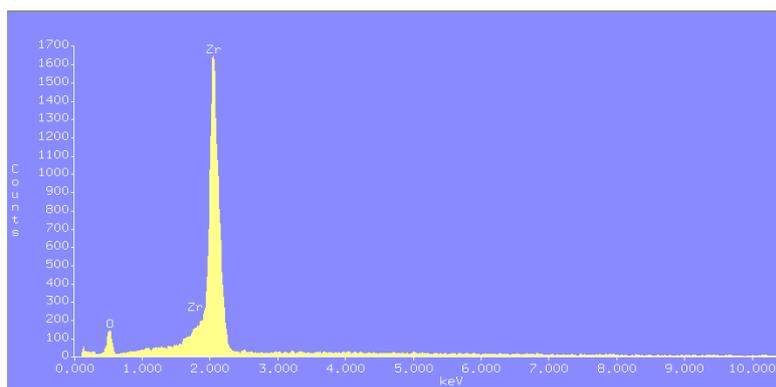


Рисунок 8 – Элементный состав поверхностного пласта керамики на основе диоксида циркония

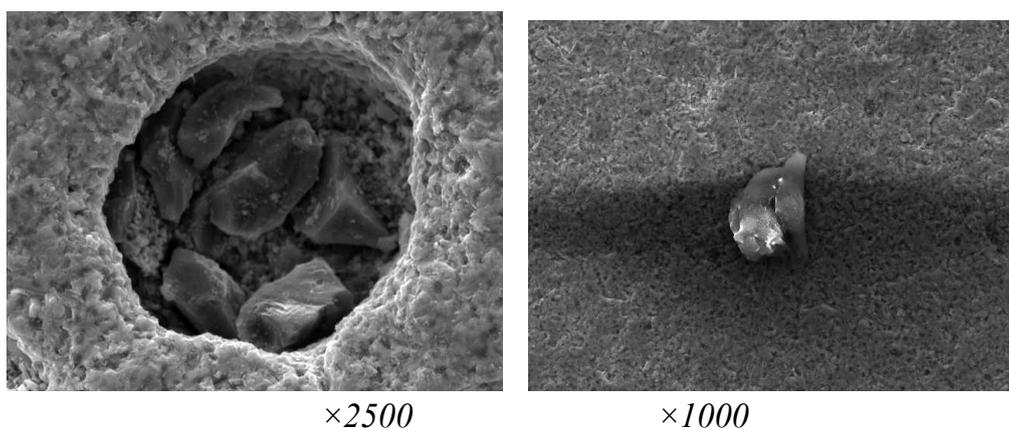


Рисунок 9 – Фотография дефектов поверхности керамических образцов на основе  $ZrO_2$

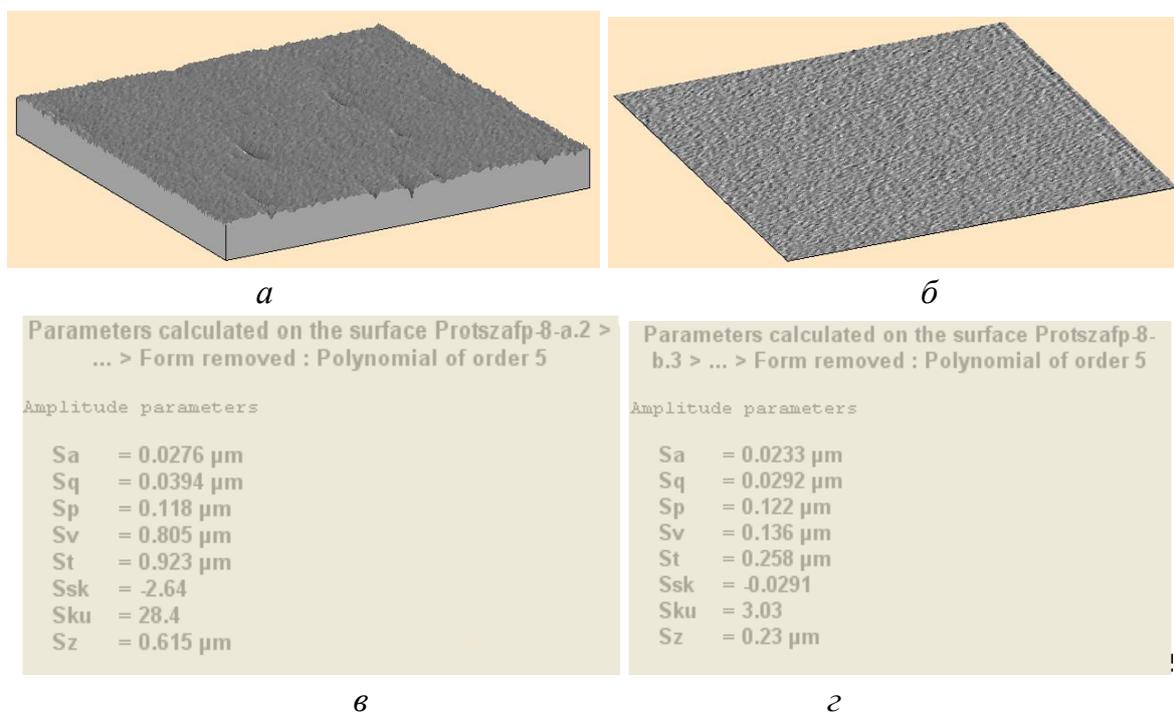


Рисунок 10 – Внешний вид и количественные характеристики обработанной поверхности пластинки из искусственного сапфира [3]

Так после анализа состояния обработанной поверхности пластинок из искусственного сапфира и диоксида циркония следует пересмотреть кривые зависимости линейного износа и коэффициента трения от количества циклов работы пары трения.

Как видно из рисунка 11 изменение коэффициента трения в зависимости от качества обработанной поверхности составляет до 30% и это расхождение не зависит от количества проведенных циклов испытаний.

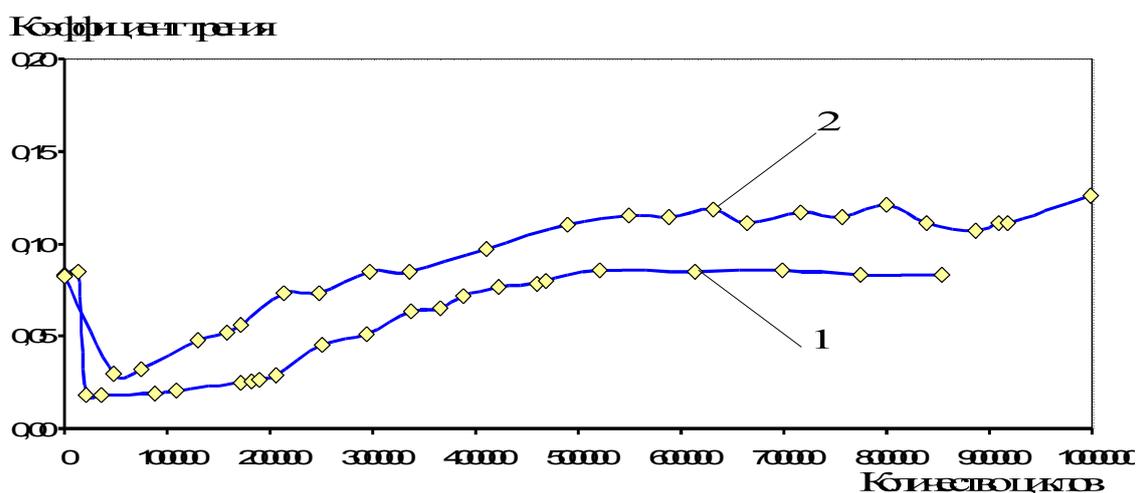


Рисунок 11 – Зависимость коэффициента трения пары сапфир-хирулен от количества циклов испытания [4]: 1 – поверхность искусственного сапфира, имеющая дефекты предварительной обработки; 2 – поверхность искусственного сапфира не имеющая дефектов предварительной обработки.

Так же проводили исследование состояния поверхности исследуемых образцов после  $\times 10^6$  циклов работы пары трения на оптическом микроскопе (рис. 12, 13).



Рисунок 12 – Состояние поверхности исследуемого образца из искусственного

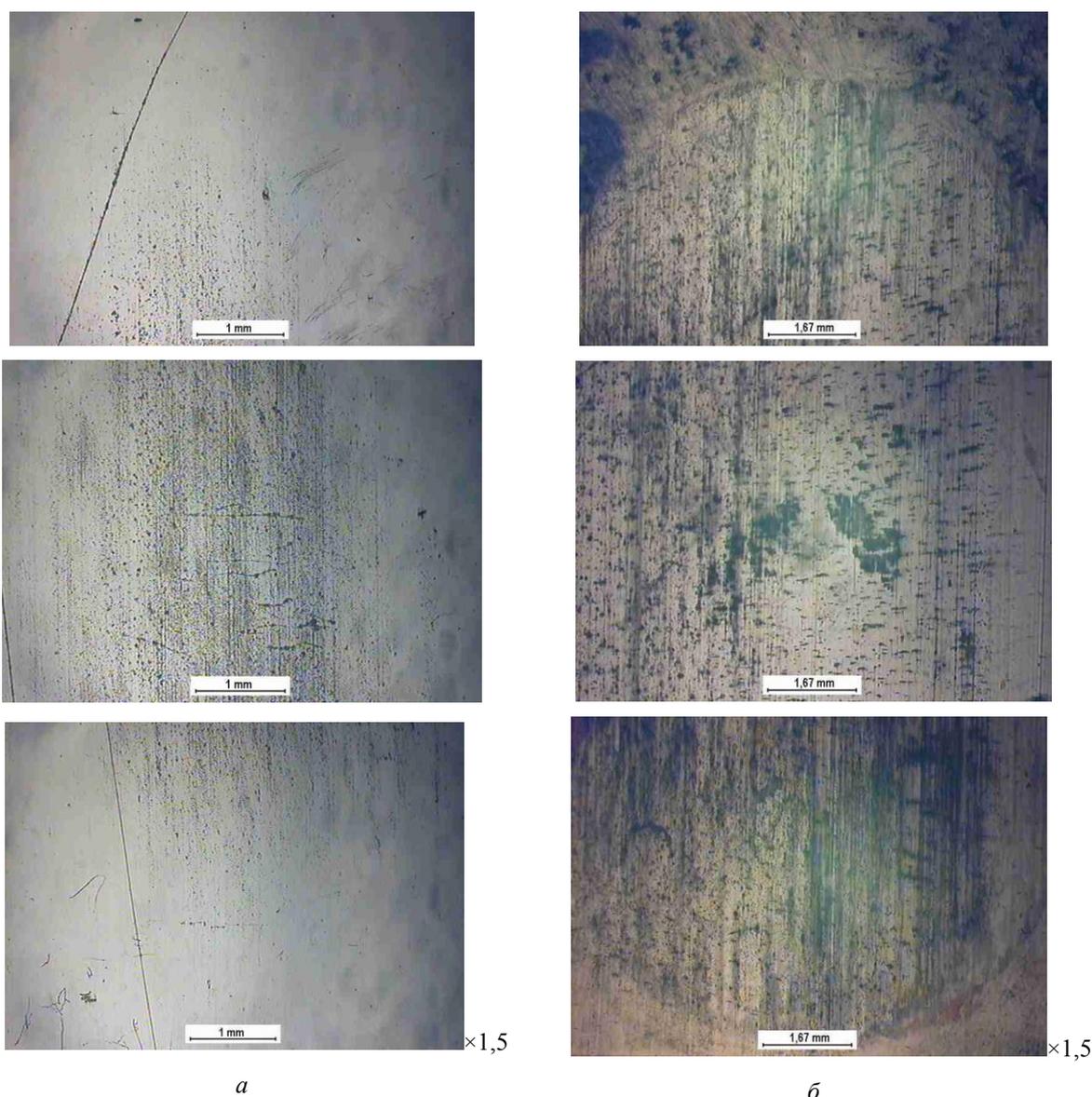


Рисунок 13 – Состояние поверхности исследуемых образцов после  $\times 10^6$  циклов работы пары трения: а – искусственного монокристалла сапфира; б – Диоксида циркония монокристалла сапфира после  $\times 10^6$  циклов работы пары трения

Как видно из рисунков 12, 13 на поверхности образцов, как из искусственного монокристалла сапфира, так и керамики на основе диоксида циркония присутствуют налипшие частицы контртела – Хирулен. Справедливым будет утверждение, что процесс трения пары происходит в первый период работы пары по поверхности искусственный монокристалл сапфира – хирулен, керамика на основе диоксида циркония – Хирулен. Далее процесс трения происходит по поверхностям Хирулен – Хирулен, и соответственно линейный износ пары связан в первую очередь с адгезионным износом самого Хирулена и в незначительной степени исследуемого материала.

1. При сравнении и анализа комплекса результатов трибологических исследований металлических, керамических биосовместимых материалов и искусственного монокристалла сапфира выделены пары трения сапфир-Хирулен и керамика на основе диоксида циркония-Хирулен, как наиболее перспективные для применения в эндопротезах тазобедренного сустава человека. Исследования показали, что искусственный монокристалл сапфира и керамика на основе диоксида циркония при их использовании в паре с Хируленом увеличивают до 30% ресурс работы эндопротеза тазобедренного сустава человека по сравнению с парой Co-Cr-Mo-Хирулен

2. Проведен детальный анализ обработанной поверхности пластинок из диоксида циркония и искусственного сапфира. Установлена зависимость коэффициента трения и работоспособности пары трения от наличия дефектов предшествующей механической обработки. На основании установленной взаимосвязи необходимо определить оптимальное соотношение площадей опорной поверхности и карманов, для снижения времени и стоимости технологии обработки поверхности.

3. Выявлено позитивное влияние дефектов предшествующей обработки на работоспособность пары трения. Установлено, что линейный износ пары трения искусственный сапфир-хирулен с наличием дефектов предшествующей механической обработки снижается до 30 %, коэффициент трения – до 25%. Наличие дефектов поверхности отыграет роль карманов для смазывающей биологической жидкости и емкостей для выхода продуктов износа. Последние эффективно удаляются с рабочих поверхностей и не осуществляют процесс их микрорезания. Наличие карманов для биологической жидкости и продуктов износа пары трения никаким образом не снижает общую опорную площадь рабочей поверхности детали. Так на глубине до 0.2 мкм она составляет более 98 % исследуемой площади поверхности.

4. При повторном анализе результатов проведенных трибологических испытаний наилучшие показатели работоспособности и условий изнашивания показала пара трения искусственный сапфир-хирулен, где на поверхности сапфировой пластинки были оставлены карманы для удержания биологической жидкости и продуктов износа. Это позволяет утверждать, что выведение данных карманов является излишним и снижает затраты времени, дорогостоящего инструмента и материалов при изготовлении поверхностей подвижного соединения. Установленный факт дает возможность сделать предположение, что при создании пары трения искусственный монокристалл сапфира-диоксид циркония или искусственный сапфир - искусственный сапфир эффективная работа пары и максимальная ра-

ботоспособность будет достигнута в случае обеспечения на одной из поверхностей удерживающих карманов

5. Наименьшие значения линейного износа UHMWPE демонстрирует сапфир 8b при уровне коэффициента трения этой пары, сопоставимом с коэффициентом трения пары сплав Co-Cr-Mo/UHMWPE.

6. Линейный износ UHMWPE в парах с сапфиром 1a, 8a выше, чем у сплава Co-Cr-Mo, а уровень коэффициента трения у пары с керамикой 8a стабильно ниже, чем у пары со сплавом Co-Cr-Mo.

7. Линейный износ UHMWPE в парах трения с ZrO<sub>2</sub>-керамикой обоих видов несколько ниже, чем у сплава Co-Cr-Mo, а коэффициент трения у пары с керамикой 1a на 0,04 ед. ниже, чем у пары со сплавом Co-Cr-Mo.

8. Среднее значение линейного износа пары трения с UHMWPE за 1 млн. циклов у наноструктурного титана с азотированием поверхности сопоставимо с этим показателем у сплава Co-Cr-Mo, однако темп его возрастания за тот же период времени в 6 раз выше. При этом коэффициент трения у пары с нано-Ti на 0,025–0,03 ед. выше, чем у пары со сплавом CoCrMo, и темп его возрастания несколько выше.

9. Темп возрастания линейного износа пары трения нано-Ti/UHMWPE на порядок выше, чем у пары сплав Co-Cr-Mo/UHMWPE. Коэффициент трения у пары с нано-Ti на 0,07 ед. выше, чем у пары со сплавом Co-Cr-Mo.

**Список использованных источников:** 1. Протезирование суставов, эндопротезирование [Cited 2009, 22 June].- Available from: < <http://www.health-ua.org/mc/?topic=1206>>. 2. Розенберг О.А., Сохань С.В., Возный В.В., Турманидзе Р.С. Исследование пар трения сапфир/сапфир и сапфир/рубин. Сучасні технології в машинобудуванні Зб. Наукових праць. Вип. 1. – Харків НТУ «ХПІ» 2008. - С.164-176. 3. Gawlik J., L.A. Litvinow, W. Picoszewski, Rozenberg O.A., Sokhan S.V., M. Szczerek, Voznyy V.V Tribologiczne badania materialow ceramicznych na endoprotezy stawu biodrowego. Tribologia. Rradom. № 3/2005 (201). P.59 – 73. 4. О.А. Розенберг А.А. Шульженко, С.В.Сохань, А.Н.Соколов, Возный В.В. Влияние анизотропии сапфира на иммунологические, трибологические и прочностные характеристики материала. Високі технології в машинобудуванні: Зб. наук праць НТУ “ХПІ”. – Харків, 2007. – Вип.2 (15). – 281 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Protezirovanie sustavov, jendoprotezirovanie [Cited 2009, 22 June].- Available from: < <http://www.health-ua.org/mc/?topic=1206>>. 2. Rozenberg O.A., Sohan' S.V., Voznyij V.V., Turmanidze R.S. Issledovanie par trenija sapfir/sapfir i sapfir/rubin. Suchasni tehnologii v mashinobuduvanni Zb. Naukovih prac'. Vip. 1. – Harkiv NTU «HPI» 2008. - S.164-176. 3. Gawlik J., L.A. Litvinow, W. Picoszewski, Rozenberg O.A., Sokhan S.V., M. Szczerek, Voznyy V.V Tribologiczne badania materialow ceramicznych na endoprotezy stawu biodrowego. Tribologia. Rradom. № 3/2005 (201). P.59 – 73. 4. O.A. Rozenberg A.A. Shul'zhenko, S.V.Sohan', A.N.Sokolov, Voznyj V.V. Vlijanie anizotropii sapfira na immunologicheskie, tribologicheskie i prochnostnye harakteristiki materiala. Visoki tehnologii v mashinobuduvanni: Zb. nauk prac' NTU “HPI”. – Harkiv, 2007. – Vip.2 (15). – 281 s.

***А.Л. СТАНОВСКИЙ, П.С. ШВЕЦ,  
И.Н. ЩЕДРОВ***, Одесса, Украина

## **ОПТИМИЗАЦИЯ СЛАБОСВЯЗАННЫХ СИСТЕМ В АВТОМАТИЗИРОВАННОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ И УПРАВЛЕНИИ**

Показано, что слабо связанные системы в машиностроении составляют широкое поле объектов, при проектировании и управлении которыми возникают специфические проблемы в решении задач оптимизации. В частности, для этого неприменимы комплексные генетические алгоритмы, разработанные для оптимизации сильно связанных систем. Предложен метод оптимизации слабо связанных систем с помощью генетических алгоритмов, который позволяет учесть физическую природу связности.

It is shown that poorly connected systems in mechanical engineering make a wide range of objects, at designing and control of which specific problems in the decision of optimization tasks arise. In particular, the complex genetic algorithms developed for strongly connected systems optimization are inapplicable for this purpose. The method of poorly connected systems optimization by means of genetic algorithms which allows to consider the physical nature of connectivity is offered.

*A.L. STANOVSKIY, P.S. SHVEC, I.N. SHVEDROV*

### *OPTIMIZATION OF LOOSELY COUPLED SYSTEMS IN THE AUTOMATED DESIGNING AND MANAGEMENT*

It is shown that poorly connected systems in mechanical engineering make a wide range of objects, at designing and control of which specific problems in the decision of optimization tasks arise. In particular, the complex genetic algorithms developed for strongly connected systems optimization are inapplicable for this purpose. The method of poorly connected systems optimization by means of genetic algorithms which allows to consider the physical nature of connectivity is offered.

Под системой понимается совокупность взаимосвязанных элементов, обособленная от среды и взаимодействующая с ней как целое [1]. Существенное влияние на поведение элементов системы и свойства ее как целого оказывает мера (сила, энергия, информация) их связей. Это позволяет выделить класс *слабо связанных систем*.

Мир, в котором мы живем, является миром со слабыми причинно-следственными связями [2, 3]. Действительно, реальные системы имеют так называемые «ступенчатые функции» [4], которые при небольших вариациях возмущающих воздействий не дают им распространяться к дру-

гим системам. Более того, именно благодаря слабой связанности мира, можно выделить в нем отдельные системы, а в них подсистемы.

Под слабосвязанной понимают такую систему, в которой взаимодействие элементов достаточно сильно для формирования системных свойств, но недостаточно для изменения качественных свойств отдельных элементов [1].

Для систем, образованных элементами со сложной внутренней структурой, понятие слабосвязанной системы не является однозначным. Взаимодействие элементов системы может вызывать изменение одних характеристик элементов и не оказывать влияния на другие. Вопрос об идеальности или неидеальности системы в данном случае следует решать, исходя из того, являются ли изменяющиеся при взаимодействии характеристики существенными для анализа конкретной системы и конкретного свойства [1].

Рассмотрим конкретный пример. Пусть некоторая производственная система – технологический процесс – состоит из двух подсистем-операций, осуществляемых над предметами труда в камере печи прерывистого действия со встроенным нагревательным элементом (рис. 1 а). Очевидно, что режимы операций могут изменяться независимо, за исключением температуры, всегда общей для отдельных подсистем при такой конструкции печи. Благодаря этому, температура, собственно, и будет сильной связью, накладывающей жесткие ограничения как на объект, так и на его модели.

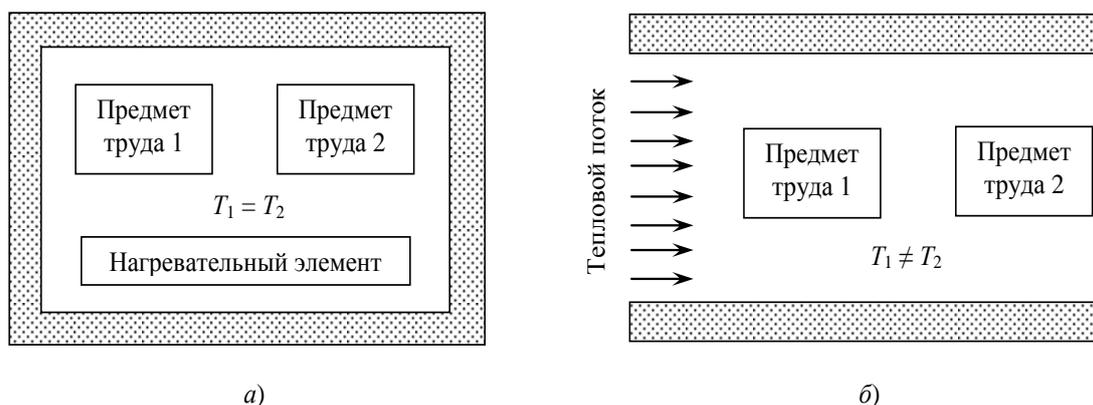


Рисунок 1 – Примеры сильно (а) и слабосвязанных (б) операций в технологическом процессе обработки нагревом

Если же применить печь другой конструкции – проходную с нагревом тепловым потоком от внешнего нагревательного элемента (рис. 1 б), система становится слабосвязанной, т.к. с помощью определенных операций (изменение характеристик теплоносителя, перемещение нагреваемых

предметов труда) разница между температурами может быть не только отличной от нуля, но и изменяться в определенных пределах.

Изменения в связности подсистем в случае механического объекта (конструкции, технологии) полностью определяются его физической природой. Эти связи, как и в любых других многоэлементных системах, могут носить детерминированный, стохастический, а также нечеткий характер, предоставляя исследователю, проектировщику или специалисту по управлению широкие возможности при построении моделей таких объектов.

В частности при оптимизации слабосвязанных технологических процессов в САПР-Т модель, наиболее точно отражающую феноменологию объекта моделирования, можно получить, объединив генетические алгоритмы и понятия нечетких множеств [5, 6].

Рассмотрим отличия в подходах к оптимизации различных по связности систем.

*Несвязанные системы.* Пусть фенотип некоторой группы элементов (подсистем) предполагаемой системы  $A_i$  ( $i = 1...N$ ), описывается двумя аргументами – переменными  $x_i$  и  $y_i$  при групповых ограничениях  $0 \leq x \leq x_{max}$  и  $0 \leq y \leq y_{max}$ . Состояние каждого элемента на графике аргументов в этом случае представляется точкой с координатами  $\{x_i; y_i\}$ . На рис. 2 представлены два таких элемента ( $N = 2$ ).

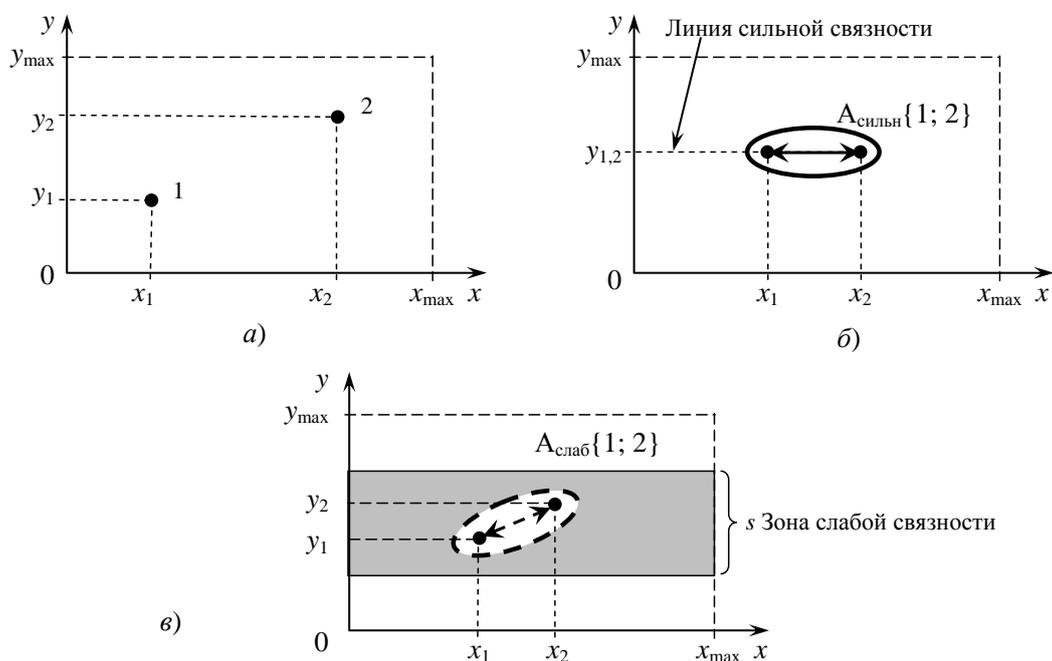


Рисунок 2 – Аргументы несвязанных (а), сильносвязанных (б) и слабосвязанных (в) подсистем

Будем считать, что в процессе оптимизации каждый из них может свободно «перемещаться» в зоне групповых ограничений (рис. 3 а), изменяя вместе с аргументами  $x$  и  $y$  также целевую функцию

$$z_i = z(x_i, y_i). \quad (1)$$

В этом случае отсутствие любого взаимодействия приводит к тому, что совокупность элементов утрачивает системные свойства: отдельные элементы могут подвергаться оптимизации без какой-либо «оглядки» на другие.

*Сильносвязанные системы.* В работе [7] описаны объекты, обладающие дополнительным жестким ограничением на изменение фенотипа: одна из переменных (например,  $y$ ) является обобщенной в том смысле, что всегда имеет место соотношение (рис. 2 б):

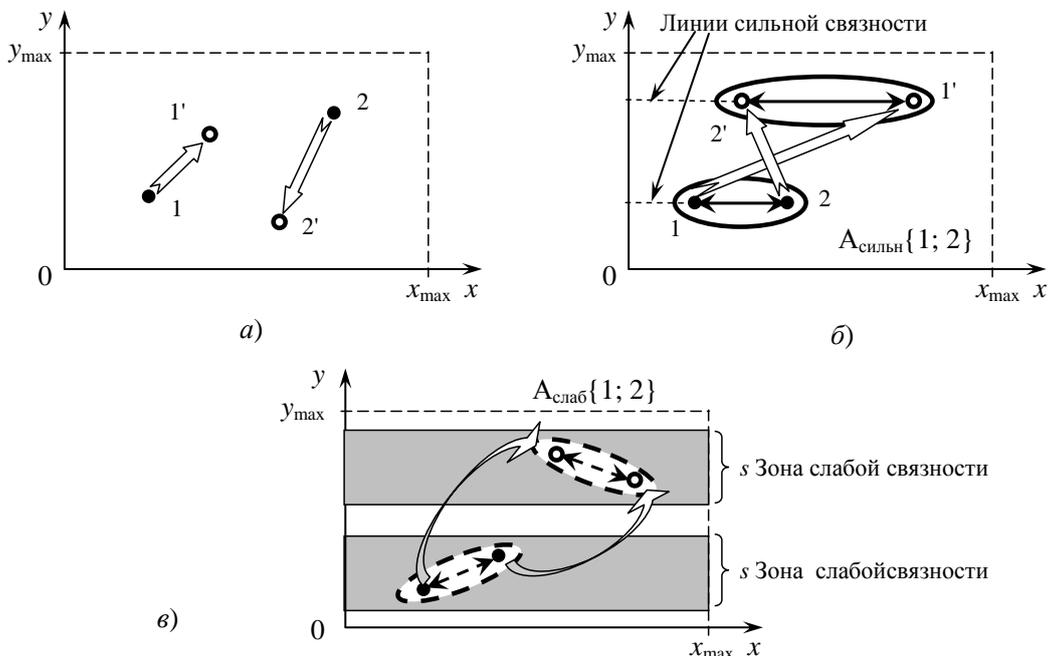


Рисунок 3 – Схемы траекторий возможных перемещений аргументов несвязанных (а), сильносвязанных (б) и слабосвязанных (в) подсистем в процессе оптимизации

$$y_1 = y_2 = \dots = y_N. \quad (2)$$

Заметим, что величины  $y_1, y_2, \dots, y_N$  могут изменяться, но только одновременно, так, чтобы не нарушалось соотношение (2) (рис. 3 б).

*Слабосвязанные системы.* В настоящей работе рассматриваются объекты, у которых свойство (2) менее жесткое: отклонение аргументов  $y_1, y_2, \dots, y_N$  друг от друга допускаются, но только в пределах некоторой зоны связности (рис. 2 в) шириной  $s$ , причем такие отклонения могут носить детерминированный, стохастический, а также нечеткий характер.

При стохастическом характере распределение вероятности отклонений по сечению зоны связности зависит от свойств объекта и условий его эксплуатации. Пусть  $p_{21}(y)$  – вероятность того, что случайная величина  $y_2 - y_1$  примет значение  $y$  из диапазона  $0 \leq y_2 - y_1 \leq s$ , где  $s$  – ширина зоны связности в единицах, в которых измеряется обобщенный параметр  $y$ . При оптимальном проектировании зона связности может перемещаться, изменять свою ширину  $s$ , которая также является случайной величиной, но слабо-связанные элементы будут всегда оставаться внутри нее (рис. 3 в).

По сравнению с существующим методом комплексного генетического алгоритма [8] к операторам скрещивания, мутации и инверсии здесь добавляется еще один – оператор поворота, который «разворачивает» обобщенный ген в пределах зоны связности таким образом, чтобы вероятность выбора угла разворота была пропорциональна вероятности распределения случайной величины  $p_{21}(y)$ . Такая операция служит дополнительным фактором улучшения сходимости алгоритма и, соответственно, эффективности всего метода эволюционной оптимизации.

Ширина зоны связности  $s$  может рассматриваться в качестве нечеткой переменной в том смысле, что находящиеся внутри нее элементы находятся в нечеткой связности. Нечеткое отношение определяется [9] как любое нечеткое подмножество упорядоченных кортежей параметров, оценивающих связность, построенных из элементов тех или иных базисных множеств. При этом под кортежем понимается произвольный набор или список упорядоченных элементов. В общем случае нечетким  $k$ -арным отношением, заданным на множествах  $X_1, X_2, \dots, X_k$ , называется некоторое нечеткое подмножество декартового произведения этих множеств. Обозначим произвольное нечеткое отношение через  $Q$ :

$$Q = \{ \langle x_1, x_2, \dots, x_k \rangle, \mu_Q(\langle x_1, x_2, \dots, x_k \rangle) \}, \quad (3)$$

где  $\mu_Q(\langle x_1, x_2, \dots, x_k \rangle)$  – функция принадлежности данного нечеткого отношения, которая определяется как отображения

$$\mu_Q : X_1 \cdot X_2 \cdot \dots \cdot X_k \rightarrow [0, 1]. \quad (4)$$

Здесь через  $\langle x_1, x_2, \dots, x_k \rangle$  обозначен кортеж из  $k$  элементов, каждый из которых выбирается из своего множества. В нашем примере тип нечетких отношений задается, как бинарное нечеткое отношение между элементами из двух универсальных множеств. При этом форма и вид функции принадлежности нечеткого отношения также зависит от физического содержания элементов и условий их взаимодействия с окружающей средой.

**Список использованных источников:** 1. Бахрушин В.Е. Слабосвязанные системы в природе и обществе // Складні системи і процеси. – 2003. – № 1. – С. 21 – 25. 2. Сотник С.Л. Проектирование систем искусственного интеллекта. Конспект лекций [электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.intuit.ru/department/expert/artintell/11/2.html>. 3. Садовой А.В. Алгоритмы обучения нейронных сетей будущего // А.В. Садовой, С.Л. Сотник [электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://alife-soft.narod.ru/note/algo/algo.html>. 4. Эшби У.Р. Конструкция мозга. Происхождение адаптивного поведения. // М.: Издательство иностранной литературы, 1962. – 398 с. 5. Дорошук А.В. Применение современных методов для оптимизации электронных схем / Труды Одесского политехнического университета. – 1999. – Вып. 2(8). – С. 28 – 31. 6. Ротштейн А.П. Интеллектуальные технологии идентификации: нечеткие множества, генетические алгоритмы, нейронные сети. – Винница: Универсум-Винница, 1999. – 320 с. 7. Тонконогий В.М. Модернизация метода генетического алгоритма для оптимизации параметров многониточного резьбошлифования / В.М. Тонконогий, А.А. Перпери, Д.А. Монова // Материалы XIX семинара «Моделирование в прикладных научных исследованиях». – Одесса: ОНПУ, 17 – 18 марта 2011. – С. 3 – 4. 8. Перпери А.А. К решению задачи многоцелевой оптимизации / А.А. Перпери, В.М. Тонконогий, Д.А. Монова // Материалы XIX семинара «Моделирование в прикладных научных исследованиях». – Одесса: ОНПУ, 17 – 18 марта 2011. – С. 5 – 6. 9. Раскин Л.Г. Нечеткая математика. Основы теории. Приложения / Л.Г. Раскин, О.В. Серая. – Х.: Парус, 2008. – 352 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Bahrushin V.E. Slabosvjazannye sistemy v prirode i obwestve // Skladni sistemi i procesi. – 2003. – № 1. – S. 21 – 25. 2. Sotnik S.L. Proektirovanie sistem iskusstvennogo intellekta. Konspekt lekcij [jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <http://www.intuit.ru/department/expert/artintell/11/2.html>. 3. Sadovoj A.V. Algoritmy obuchenija nejronnyh setej buduwego // A.V. Sadovoj, S.L. Sotnik [jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <http://alife-soft.narod.ru/note/algo/algo.html>. 4. Jeshbi U.R. Konstrukcija mozga. Proishozhdenie adaptivnogo povedenija. // M.: Izdatel'stvo inostrannoju literatury, 1962. – 398 s. 5. Doroshuk A.V. Primenenie sovremennyh metodov dlja optimizacii jelektronnyh shem / Trudy Odesskogo politehnicheskogo universiteta. – 1999. – Vyp. 2(8). – S. 28 – 31. 6. Rotshtejn A.P. Intellektual'nye tehnologii identifikacii: nechetkie mnozhestva, geneticheskie algoritmy, nejronnye seti. – Vinnica: Universum-Vinnica, 1999. – 320 s. 7. Tonkonogij V.M. Modernizacija metoda geneticheskogo algoritma dlja optimizacii parametrov mnogonitoch-nogo rez'boshlifovanija / V.M. Tonkonogij, A.A. Perperi, D.A. Monova // Materialy XIX seminaru «Modelirovanie v prikladnyh nauchnyh issledovanijah». – Odessa: ONPU, 17 – 18 marta 2011. – S. 3 – 4. 8. Perperi A.A. K resheniju zadachi mnogocелеvoj optimizacii / A.A. Perperi, V.M. Tonkonogij, D.A. Monova // Materialy XIX seminaru «Modelirovanie v prikladnyh nauchnyh issledovanijah». – Odessa: ONPU, 17 – 18 marta 2011. – S. 5 – 6. 9. Raskin L.G. Nechetkaja matematika. Osnovy teorii. Prilozhenija / L.G. Raskin, O.V. Seraja. – H.: Parus, 2008. – 352 s.

**Д. О. ФЕДОРЕНКО, Д. В. РОМАШОВ,**  
**В.А.ФАДЕЕВ**, д-р техн. наук,  
**В. А. ФЕДОРОВИЧ**, д-р техн. наук, Харьков Украина

## **РАЗРАБОТКА МЕТОДОЛОГИИ 3D МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ШЛИФОВАНИЯ В РЕЖИМЕ САМОЗАТАЧИВАНИЯ**

Представлена методика і результати 3D моделювання процесу алмазно-абразивної обробки в режимі самозаточування. Встановлені умови, що забезпечують оновлення алмазних зерен, що зносилися, без примусової дії на круг. Отримані результати дозволять без проведення експериментів визначити оптимальні характеристики алмазних кругів.

Представлена методика 3D моделирования процесса алмазно-абразивной обработки в режиме самозатачивания. Установлены условия, обеспечивающие обновление износившихся алмазных зерен без принудительного воздействия на круг. Полученные результаты позволят без проведения дорогостоящих экспериментов определить оптимальные характеристики алмазных кругов.

*D. O. FEDORENKO, D. V. ROMASHOV, V.A. FADEEV, V. A. FEDOROVICH*  
*DEVELOPMENT OF METHODOLOGY 3D MODELLING OF PROCESS OF GRINDING IN THE MODE OF SELF-SHARPENING*

A 3D modeling method of diamond-abrasive treatment process in the own sharpening mode is presented. The terms, which provide the update of the worn out diamond grains without the forced influence on a circle, are exposed. The got results will allow to define the optimum descriptions of diamond circles without the conducting of expensive experiments.

*Состояние вопроса.* Эффективность применения шлифовальных кругов из СТМ зависит, прежде всего, от производительности и качества обработки деталей. Решающим фактором в повышении эффективности работы алмазно-абразивных инструментов является применение научно обоснованных режимов резания, позволяющих существенно увеличить срок службы шлифовальных кругов.

Как известно, в процессе эксплуатации алмазно-абразивных инструментов происходит затупление абразивных зерен (АЗ) и снижение их режущей способности вследствие образования площадок износа. В результате эффективность шлифования снижается, возрастает давление на деталь в зоне резания, появляются дефекты обработки в виде прожогов и огранки [1].

По мере затупления круга увеличивается радиус округления режущих граней АЗ, на которые налипают частицы шлифуемого материала. Засаливание проявляется в заполнении пространства между АЗ и пор круга

мельчайшими частицами отходов шлифования, состоящих из частиц абразива, связки и материала обрабатываемой детали. Вследствие засаливания режущая способность шлифовального круга резко снижается, причем в наибольшей степени негативное влияние этого явления проявляется при шлифовании заготовок из пластичных материалов [2].

Для восстановления режущей способности абразивного инструмента традиционно применяют специальную операцию принудительного удаления затупленных зерен – правку. Вместе с тем при эксплуатации алмазных и эльборовых кругов, АЗ которых отличаются повышенной хрупкостью, при определенных режимах шлифования проявляется эффект самозатачивания [3, 4].

Самозатачиванием называют непрерывную замену АЗ в процессе шлифования путем равномерного удаления затупившихся зерен со шлифующей поверхности круга под влиянием увеличенной силы резания. Самозатачивание имеет место в том случае, когда из-за затупления возросшее давление на зерна превышает прочность удерживающей их связки. Однако полного самовыкрашивания достигнуть на практике не удастся: в зависимости от характеристик круга и условий его работы АЗ могут выкрашиваться полностью или частично. При полном выкрашивании обнажаются новые АЗ; при частичном – на них появляются новые режущие кромки.

Примером абразивного инструмента, работающего в режиме самозатачивания, являются шлифовальные круги на бакелитовой, вулканитовой и керамических связках, используемые для заточки твердосплавного инструмента.

Следует отметить, что свойство самозатачивания проявляется только в том случае, если характеристики шлифовального круга соответствуют технологическим условиям работы. При несоответствии характеристик абразивного инструмента условиям его использования вместо полного или частичного самозатачивания наблюдаются следующие виды износа:

- быстрое сглаживание рабочей поверхности инструмента вследствие истирания выступов и кромок с образованием на зернах площадок и засорением пор стружкой и раздробленной связкой, что вызывает интенсивное теплообразование, резкое увеличение потребляемой мощности, ухудшение качества поверхностного слоя обработанной поверхности вследствие повышения температуры в зоне шлифования;
- осыпание, выкашивание работоспособных (целых) АЗ либо образование острых кромок, сопровождающееся резким снижением потребляемой мощности и уменьшением интенсивности снятия припуска на обработку [5].

Интенсивность самозатачивания алмазно-абразивного инструмента зависит от степени сопротивления, оказываемого связкой выкрашиванию зерен. Наиболее эффективное использование круга наблюдается в том слу-

чае, если связка удерживает зерна только до момента потери ими режущей способности.

В то же время при чрезмерно интенсивном самозатачивании из-за неравномерной нагрузки на зерна и неравномерного износа круг постепенно приобретает неправильную геометрическую форму, что приводит к увеличению погрешностей размеров, образованию на обрабатываемых поверхностях деталей волнистости и появлению вибраций. При дальнейшем шлифовании алмазный круг благодаря движению качания стремится восстановить правильную форму. Однако полностью восстановить правильную форму шлифовального круга не всегда удается, так как это зависит от величины припуска, величины подачи, характеристик шлифовального круга [6].

*Целью работы* является 3D моделирование процесса шлифования в режиме самозатачивания. Для решения поставленной задачи с привлечением метода конечных элементов были проведены теоретические исследования, направленные на изучение факторов и условий, определяющих реализацию режима самозатачивания шлифовальных кругов.

*Методология исследований и обсуждение результатов.* При проведении теоретических исследований были использованы программные пакеты: COSMOSWorks, ANSYS и LS-DYNA, реализующие метод конечных элементов. Реализация эксперимента, по 3D моделированию заключалось в последовательном выполнении следующих этапов.

Построение 3D модели системы «связка–зерно–металлофаза– обрабатываемый материал» осуществлялась в программном пакете SOLIDWorks, после чего модель экспортировалась в приложение COSMOSWorks. Заготовка и фрагмент связки моделировали в виде пластин, а алмаз – в виде октаэдра, размер которого зависел рассматриваемой зернистости (от 50×30×30 до 500×300×300 мкм). Наличие металла-катализатора в алмазных зернах моделировалось произвольно ориентированными пластинами, объемное содержание которых составляло от 0,6 до 6,0 %.

После построения сетки конечных элементов производилось ее сгущение в области контакта зерна и обрабатываемого материала, а также в области включений металлофазы.

На рисунке 1 представлена исходная 3D модель системы «связка–зерно–металлофаза–обрабатываемый материал»

При задании физико-механических свойств элементов системы для исходной модели были введены следующие исходные параметры:

- алмазное зерно марки АС100;
- материал заготовки – сталь 20;
- материал связки – керамика;
- состав металлофазы – никель.

Задание параметров нагружения модели производили с учетом усилий, обеспечивающих прижим алмазного круга во время шлифования за-

готовки. В ходе расчетного эксперимента, модель нагружалась нормальной силой  $F$  от 0,5 Н до 4,0 Н.

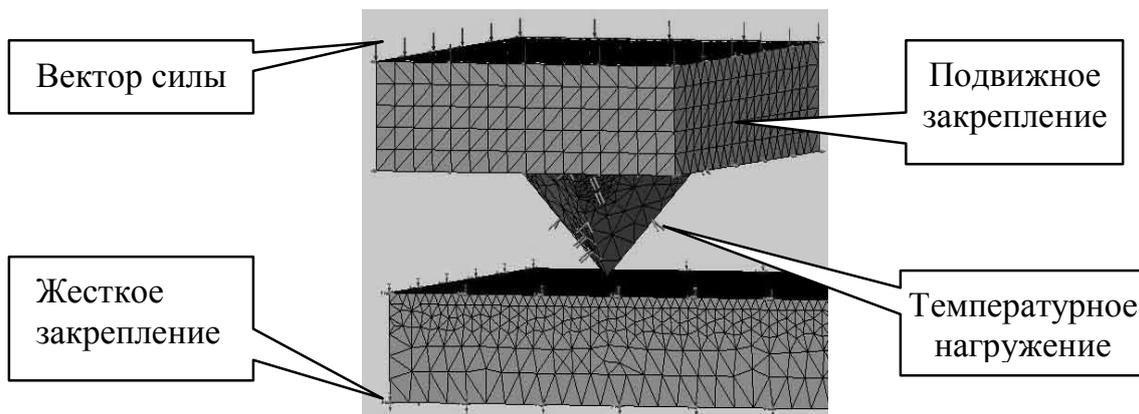


Рисунок 1 – Задание параметров нагружения модели системы «связка–зерно–металлофаза–обрабатываемый материал»

На рис.2 представлены результаты моделирования поведения системы при изменении усилия прижима алмазного зерна, которые наглядно иллюстрируют распределение напряжений, возникающих в системе. При этом включения металла-катализатора, присутствующего в рассматриваемой системе не являются концентраторами напряжений. Область проявления максимальных напряжений располагается в зоне контакта алмазного зерна и обрабатываемого материала и расширяется с увеличением усилия прижима. Установлено, что увеличением усилия прижима алмазного зерна в интервале 0,5÷4,0 Н максимальный уровень эквивалентных напряжений, наблюдаемых в системе, увеличивается в 3 раза (с 4,33 ГПа до 12,96 ГПа).

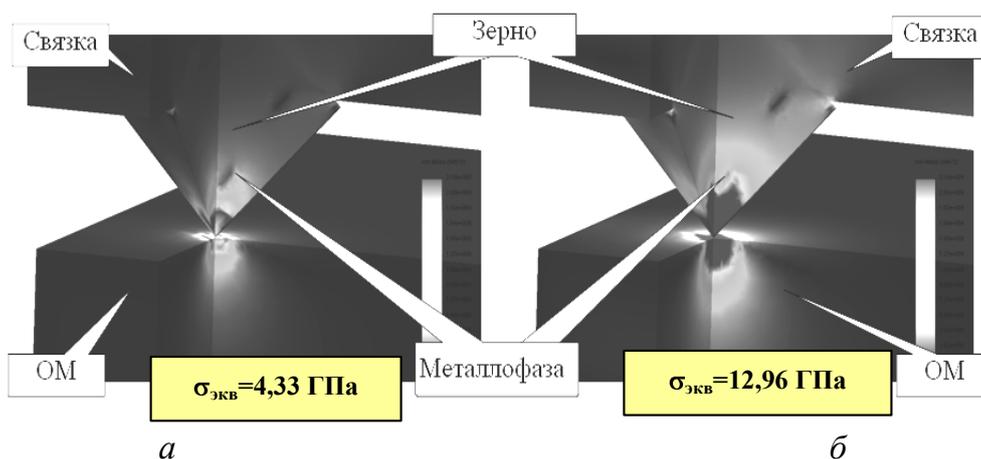


Рисунок 2 – Распределение эквивалентных напряжений при разных усилиях прижима алмазного зерна: а)  $F = 1$  Н; б)  $F = 3$  Н

При изучении поведения системы «связка–зерно–металлофаза– обрабатываемый материал» было также исследовано влияние температуры, возникающей при шлифовании, поскольку среди множества факторов, определяющих процесс засаливания абразивного инструмента отходами

шлифования, доминирующим является температура нагрева зерна, связи и обрабатываемого материала. Для проведения сравнительного анализа напряженно-деформированное состояние системы изучалось как в отсутствии нагрева, так и в режиме разных температурных нагружений (500 °С и 800 °С), имитирующих нагрев системы при шлифовании. Рис. 3 иллюстрирует распределение эквивалентных напряжений, возникающих в системе при изменении температуры и постоянном усилии прижима  $F = 3\text{ Н}$ .

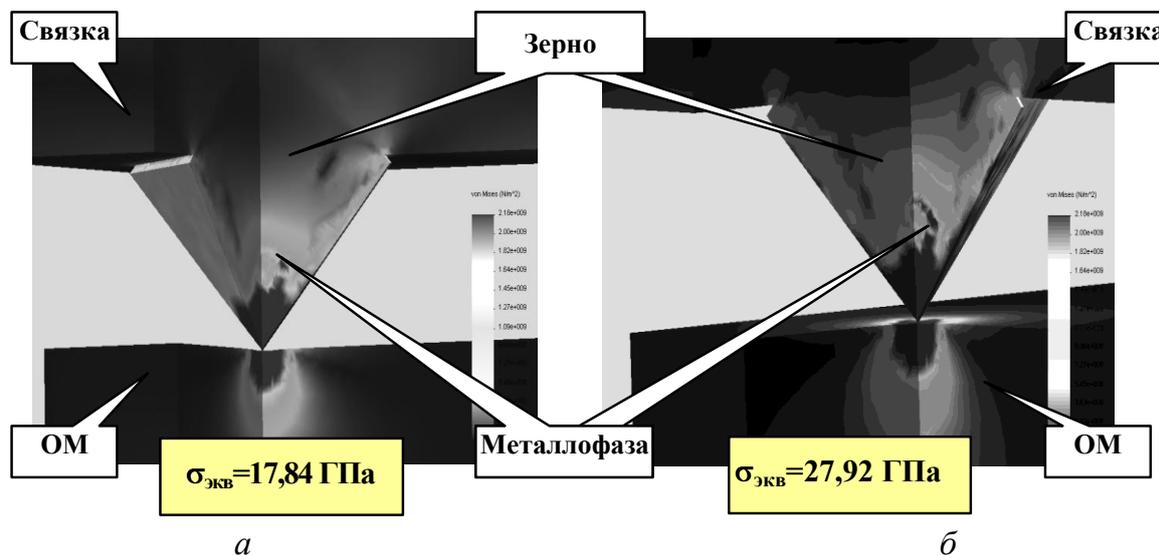


Рисунок 3 – Распределение эквивалентных напряжений при постоянном усилии прижима ( $F = 3\text{ Н}$ ) и разных температурных нагружениях: а) 500 °С; б) 800 °С

Установлено, что повышение температуры шлифования от 500 °С до 800 °С эквивалентные напряжения увеличиваются от 17,84 ГПа до 27,92 ГПа соответственно. При этом область проявления максимальных напряжений распространяется вдоль ребер алмазного зерна и охватывает участки, в которых находятся включения металлофазы. Это объяснимо влиянием температуры на поведение остатков металла-катализатора в алмазном зерне: поскольку металл-катализатор (в нашем случае никель) обладает значительно большим коэффициентом температурного расширения ( $\alpha = 17 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$ ) по сравнению с алмазом ( $\alpha = 3,7 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$ ) напряжения, возникающие на контакте алмазных зерен и металлофазы вследствие температурной нагрузки, накладываются на поля напряжений, вызванных силовой нагрузкой, что вызывает увеличение эквивалентных напряжений в участках металлофазы. Анализ результатов моделирования позволил установить, что зависимость эквивалентных напряжений от температуры носит экспоненциальный характер и удовлетворительно описывается уравнением  $\sigma_{\text{ЭКВ}} = 12,235 \cdot e^{0,001T}$  (достоверность аппроксимации  $R^2 = 0,95$ ).

Полученные результаты свидетельствуют о необходимости охлаждения зоны резания при использовании абразивного алмазного инструмента, а также о необходимости выбора металла-катализатора с наименьшим КТР при синтезе алмазов.

Поскольку определение условий и режима шлифования, обеспечивающих минимальную интенсивность налипания частиц материала заготовки на АЗ, невозможно без расчета локальных температур, в дальнейшем будет проведено моделирование поведения системы с использованием программного пакета LS-DYNA, позволяющего осуществлять динамическое 3D моделирование объектов.

*Выводы.* Проведенные исследования по определению 3D НДС зоны шлифования позволяют учесть суммарное воздействие термосиловых факторов на состояние системы «связка– зерно– металлофаза– обрабатываемый материал», спрогнозировать поведение системы и выявить оптимальные условия, обеспечивающие наиболее эффективное применение шлифовальных кругов в режиме самозатачивания.

Предложенная методология позволяет определить рациональные сочетания физико-механических свойств связки (КТР, теплопроводности, модуля упругости, пределов текучести и прочности при растяжении), характеристики алмазных зерен (марку, зернистость, концентрацию), а также подобрать режимы шлифования, при которых будет реализован процесс самозатачивания алмазно-абразивных кругов, обеспечивающий максимальный коэффициент использования потенциально высоких режущих свойств алмазных зерен.

**Список использованных источников:** 1. Суслов А. Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. – М.: Машиностроение, 2000. – 320 с. 2. Минимизация засаливания шлифовальных кругов / Л. В. Худобин, А. Н. Унянин; под. ред. Л. В. Худобина. – Ульяновск : УлГТУ, 2007. – 298 с. 3. Грабченко А. И. Расширение технологических возможностей алмазного шлифования. – Харьков: Вища школа, 1985. – 184 с. 4. Высокоэффективная обработка деталей технологического оборудования инструментом из ПСТМ на основе плотных модификаций нитрида бора / Антонюк В. С., Волкогон В. М., Муковоз Ю. А. и др. // Резание и инструмент в технологических системах.– Междунар. науч.-техн. сборник. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2008. – Вып.74. – с. 7–13. 5. Носов Н. В. Повышение эффективности и качества абразивных инструментов путем направленного регулирования их функциональных показателей: Дис. ... докт. техн. наук: 05.02.08, 05.03.01 / Самарский гос. техн. ун-т. – Самара, 1997. – 452 с. 6. Мишнаевский Л. Л. Износ шлифовальных кругов. – Киев: Наукова думка, 1982. – 192с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Suslov A. G. Kachestvo poverhnostnogo sloja detalej mashin. – M.: Mashinostroenie, 2000. – 320 s. 2. Minimizacija zasalivaniya shlifoval'nyh krugov / L. V. Hudobin, A. N. Unjanin; pod. red. L. V. Hudobina. – Ul'janovsk : UIGTU, 2007. – 298 s. 3. Grabchenko A. I. Rasshirenie tehnologicheskikh vozmozhnostej almaznogo shlifovaniya. Har'kov: Viwa shkola, 1985. 184 s. 4. Vysokojeffektivnaja obrabotka detalej tehnologicheskogo oborudovaniya instrumentom iz PSTM na osnove plotnyh modifikacij nitrida bora / Antonjuk V. S., Volkogon V. M., Mukovoz Ju. A. i dr. // Rezanie i instrument y tehnologicheskijh sistemah. Mezhdunar. nauch.-tehn. sbornik. – Har'kov: NTU «HPI», 2008. Vyp.74. s. 7-13. 5. Nosov N. V. Povyshenie jeffektivnosti i kachestva abrazivnyh instrumentov putem napravlennogo regulirovaniya ih funkcional'nyh pokazatelej: Dis. ... dokt. tehn. nauk: 05.02.08, 05.03.01 / Samarskij gos. tehn. un-t. – Samara, 1997. – 452 s. 6. Mishnaevskij L. L. Iznos shlifoval'nyh krugov. – Kiev: Naukova dumka, 1982. – 192 s.

*U. HEISEL*, Dr.-Ing. Dr. h.c. mult.; *S. PASTERNAK*, M. Sc.;  
*M. STORCHAK*, Dr. Sc. tech., Stuttgart, Germany

## **OPTIMAL CONFIGURATIONS OF THE MACHINE TOOL STRUCTURE BY MEANS OF NEURAL NETWORKS**

*У. ХЕЙЗЕЛЬ, С. ПАСТЕРНАК, М. СТОРЧАК*

### *ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ МЕТАЛОРИЗАЛЬНЫХ ВЕРСТАТОВ ЗА ДОПОМОГОЮ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ*

Стаття присвячена автоматизації розробки металорізальних верстатів на фазі вибору їхньої оптимальної структури за допомогою нейронних мереж. Для цього мети розроблені алгоритм і програма його реалізації. За допомогою їх визначаються безліч конфігурацій всіх можливих структур верстата на основі відносин між рухами інструмента, заготівлі й вузлів верстата. Потім, конфігурації структури, які відповідають необхідним технічним вимогам, витягають із цієї безлічі. Логічні операції засновані на булевой алгебрі. Через їхню здатність до навчання використання нейронних мереж забезпечує більше гнучкий і швидкий вибір оптимальних структур металорізальних верстатів.

Статья посвящена автоматизации разработки металлорежущих станков на фазе выбора их оптимальной структуры с помощью нейронных сетей. Для этого цели разработаны алгоритм и программа его реализации. С помощью них определяются множество конфигураций всех возможных структур станка на основе отношений между движениями инструмента, заготовки и узлов станка. Затем, конфигурации структуры, которые отвечают необходимым техническим требованиям, извлекают из этого множества. Логические операции основаны на булевой алгебре. Из-за их способности к обучению использование нейронных сетей обеспечивает более гибкий и быстрый выбор оптимальных структур металлорежущих станков.

This paper deals with the automations of the machine tools' development in the phase of selecting the optimal structure's configuration by means of neural networks. For this purpose, an algorithm and a programme were developed. By using of them a set of all possible machine tool structure's configurations on the basis of the relations between the movements of tool, workpiece and machine tool units by the machining is determined. Then, structure's configurations, which meet the needed technical requirements, are extracted from this set. The usage of neural networks, due to their learning ability, makes the performance of these steps not only faster as the manual performance but more flexible as the similar programmes based on Booleans logic.

### **INTRODUCTION**

The selection of suitable machine tools represents a significant part of production preparation. To guarantee the required accuracy, stiffness, reliability, performance, etc., machine tools need to fulfil a number of requirements, which substantially depend on their structure's configurations. It is therefore necessary

to determine the configuration of the machine tool structure in such a way that it meets the technical requirements to the highest degree 0, 0, 0.

The configuration of the machine tool structure is generally selected by highly qualified design engineers, which rely on their experience and intuition. Using intuition and experience, however, does not guarantee that the optimal configuration will be selected. This is mainly because a general algorithm for the selection of machine tool structure's configuration does not exist and because only known solutions are considered, but not all possible configurations 0.

To determine and further analyse different machine tool structure's configuration, various scientific methods have been developed 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0. Special attention is given to the method of selecting of the optimal machine tool structure's configuration according to structural characteristics. The algorithm of this method consists of three phases 0, 0, 0, 0:

- determination of the total number of possible configurations;
- structural extraction of subsets, which fulfil the needed requirements;
- final selection of optimal machine tool structure's configuration by comparing their technical and economic characteristics.

Several studies have shown that the method of synthesis of structure's configurations on the basis of the relations between the movements of tool, workpiece and machine tool units is the most suitable method for determining the total number of possible configurations by shape generation 0, 0, 0. The subsets are structurally extracted according to the formulated conditions for machine tool structure's configurations, which determine the necessary spatial location and alignment of the machine tool units 0, 0, 0, 0. In the final selection of the best configuration, methods of the cost-utility analysis are applied, the algorithm of which comprises the compiling of a list of important criteria, the elaboration of a rating scale and the evaluation by convolution of all criteria 0.

The manual performance of all steps mentioned above is very time-consuming and slows down the development of machine tools in general. This is unacceptable for modern market conditions and reduces competitiveness. Therefore, the automation of this process is necessary. Today, the process is implemented with special software for the determination of optimal configurations 0, 0, 0. A particular feature of this software is that it is developed on the basis of the Boolean logic. Such a design causes inflexibility in solving new tasks and optimising existing structure's configurations. To add a new condition into the algorithm for determining of the optimal configuration, for example, the programme code or the database of the entire software needs to be changed. This certainly entails an enormous time and cost effort. This disadvantage can be

overcome by using the Fuzzy logic, e.g. of neural networks, which are characterised by high flexibility and their learning ability 0, 0. This learning ability creates a possibility to adapt the programme or the database without the software correction. This considerably reduces the time for solving new tasks and optimising existing configurations.

This paper describes a possible way to the automation of the first and second phase (see above) of the selection of optimal machine tool structure's configurations by means of neural networks.

#### *DETERMINING OF POSSIBLE MACHINE TOOL STRUCTURE'S CONFIGURATIONS*

The total number of possible machine tool structure's configurations can be determined according to the method described in 0, 0, 0. This method is based on the relations between the movements of the workpiece, the tool and hence all machine tool units in the shape generation process. To simplify the machine tool design, complex relative movements of the tool and workpiece are combined from the elementary movements of the machine tool units: from three translational movements along the axes x, y, z and three rotary movements around the same axes. Accordingly to that, the relative movements of the tool and workpiece can be expressed as a coordinate code 0, 0, 0:

$$k = k_1 k_2 \dots k_i, \quad (1)$$

where  $k_i$  ( $i=1, \dots, n$ ) is the movement of the  $i$ -th machine tool unit relative to the  $(i-1)$ -th unit. 1, 2, 3 describe the codes of the translational movements along the axes x, y, z and 4, 5, 6 – the codes of the rotary movements around the axes x, y, z.  $n$  is the number of the mobile machine tool units.

The coordinate code is generated according to the kinematic scheme of the shape generation process. It is to formulate with the following rules 0:

1. The coordinate code should start with the code of the workpiece movement.
2. In the coordinate code, the codes of the rotary movements come first. Then – the codes of the translational movements.
3. Priority is given to the relative movements and then to the guided movements.
4. The codes of the movements are recorded according to increasing of their number.
5. Taking into account these rules, the coordinate code (1) for gear machining with profile milling cutters (see Figure 1), for example, is as follows:

$$k = 61234. \quad (2)$$

In order to receive the code of a complete machine tool structure's configuration from the coordinate code (1), which describes a set of mobile machine tool units, it is necessary to add an immobile basis unit – a machine bed. Symbolically, this is realised by adding the digit “0” to the coordinate code on any position. The thus received coordinate code is called the code of the machine tool structure's configuration. From the coordinate code (2), for example, the following structure's configuration's codes can be derived by adding “0”:

$$\begin{aligned}
 K_{C_1} &= 612340; & K_{C_2} &= 612304; & K_{C_3} &= 612034; & K_{C_4} &= 610234; \\
 K_{C_5} &= 601234; & K_{C_6} &= 062314.
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

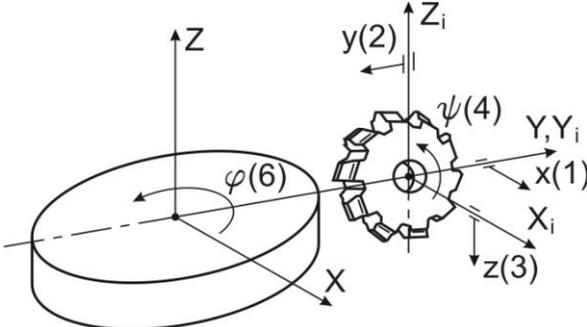


Figure 1 –Kinematic diagram of gear machining with profile milling cutters

Figure 2 shows the two machine tool structure's configurations that correspond to the codes 601234 and 610234.

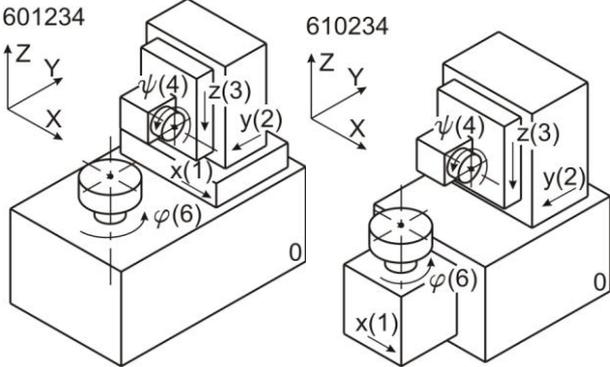


Figure 2 – Examples of gear milling machine structure's configurations

The change of the position of the machine bed and of the corresponding code is not the only possibility to determine alternative machine tool structure's configurations, which have the same shape generation abilities. New configurations can also be obtained by permutations, aggregations or disjunctions of machine tool units or digits in the structure's configuration's code  $k$ . Only the following four transformations or a combination of these do not change the shape generation's scheme 0:

- Permutation (rearrangement) of two neighbouring units, which perform translational movements along different axes: 12 = 21, 23 = 32 31 = 13.
- Permutation (rearrangement) of two neighbouring units, the first of which performs the translational movement along the axis and the second of which performs the rotary movement around the same axis (or the unit, which represents a cylindrical pair): 14 = 41 25 = 52, 36 = 63.
- Aggregation (combination) of several units into one, which performs the same movement relative to the same axis: 11 = 1, 22 = 2 33 = 3, 44 = 4, 55 = 5, 66 = 6.
- Disjunction (separation) of one unit into several units, which perform the same movement: 1 = 11; 2 = 22; 3 = 33; 4 = 44; 5 = 55; 6 = 66.

Another option to obtain alternative machine tool structure's configurations is the change of the spatial alignment of its coordinate system. Symbolically, this is realised by the circular permutation of the digits in the code of structure's configuration according to two schemes: 1 → 2 → 3 → 1 and 4 → 5 → 6 → 4.

The total number of configurations with the same shape generation abilities, which can be obtained by using the three methods described above, is determined with the following equation 0:

$$N = n + 1 \cdot N_p \cdot N_f, \quad (4)$$

where  $n$  is – the number of mobile machine tool units.  $N_f$  – is the number of configurations, which can be obtained by the four permissible transformations.  $N_p$  – is the number of configurations, which can be obtained by spatial rotations of the machine tool according to the change of its coordinate system.

The total number of possible structure's configurations of a hobbing machine with coordinate code (2), calculated according to formula (4), equals 198.

The determination of the set of possible structure's configurations of machine tools on the basis of their kinematic schemes of shape generation is automated with a C++ programme, which was developed for this purpose. When the programme is used, the coordinate code of the machine tool or of its kinematic scheme of shape generation should be entered. The result of the calculation is delivered as a text file with a complete list of all possible machine tool designs. Simultaneously, the programme creates an input file for the neural network.

#### *STRUCTURAL EXTRACTION OF A SUBSET OF CONFIGURATIONS*

Machine tool structure's configurations that fulfil the required conditions are structurally extracted by means of neural networks. The significant difference and advantage of neural networks, compared to conventional methods, is

their *learning ability* 0. Neural networks are trained or instructed by means of examples that are combined into learning sets. The learning sets consist of input and corresponding output data. In the course of learning, the learning sets are analysed and possible dependencies in their structure are determined. Due to these dependencies, rules are created, according to which the further classification can be carried out 0, 0.

The learning set of the neural network is shown in the form of a connectivity matrix  $T$ :

$$T = \begin{bmatrix} k_{1,1} & k_{1,2} & \dots & k_{1,j-1} & k_{1,j} \\ k_{2,1} & \ddots & & & k_{2,j} \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ k_{i-1,1} & & & \ddots & k_{i-1,j} \\ k_{i,1} & k_{i,2} & \dots & k_{i,j-1} & k_{i,j} \\ c_1 & c_2 & \dots & c_{j-1} & c_j \end{bmatrix}, \quad (5)$$

which consists of the  $i$ -th number of input vectors (input data of the learning algorithm):

$$\mathbf{p}_i = [k_{i,1} \quad k_{i,2} \quad \dots \quad k_{i,j-1} \quad k_{i,j}], \quad (6)$$

and of the target vector  $T_C$  (output data of the learning algorithm):

$$\mathbf{T}_c = c_1 \quad c_2 \quad \dots \quad c_{i-1} \quad c_i. \quad (7)$$

The elements  $k_{i,j}$  of the input vectors (6) are generated according to the structural conditions of the extraction of machine tool structure's configurations. These conditions are formulated and determined in the form of structure equations. These structure equations are similar to the structure's configuration's code (3) and have the same number of digits for a defined machine tool. Each of the structure equations, however, does not only correspond to an individual configuration, but to a configurations' set that fulfils a condition of the extraction 0.

The combination of structure equations is explained with the example of a gear milling machine with coordinate code (2). The machine is designed for the machining of medium size workpieces. In this case, the extraction conditions are formulated as follows:

1. The rotation axis of the workpiece should be vertical since structure's configurations with horizontal and tilted rotation axis are suitable for the machining of long parts with small diameter 0. This can be illustrated with the following equation, which describes a configuration's subset with the number

„6“ at the beginning of the code (the machine tool unit rotating around the vertical axis z):

$$\forall_{\square} B \exists_{\square} I \left( \phi_z = \frac{\pi}{2} \right) : M_1 \Rightarrow 677777 \vee 767777 \vee 776777 , \quad (8)$$

where  $\square$  is the space of definition of all machine tool structure's configurations.  $B$  is a set of all existing machine tool structure's configuration and  $I$  – a subset of all configurations that need to be determined.  $\phi_z$  is an inclination angle of the rotation axis of the workpiece to the horizontal level.  $M_1$  describes the subset that fulfils the first extraction condition.

A random digit of the structure's configuration's code, i.e. from 0 to 6, can be on the position of number "7". This position is only required to ensure that all elements of the neural network's learning vector have the same number of characters. This guarantees a correct learning process and further programme functions.

2. Tool and workpiece need to be mobile. The configurations with immobile tool are very complicated and inefficient in the production. The configurations with immobile workpiece are only suitable for machining of very large parts 0. For this condition, the position of the digit "0" or the machine bed's position is important, which can be on any but the first and last position. Therefore, the second condition can be described with the following logical equation:

$$\forall_{\square} B \exists_{\square} I F \wedge W \Rightarrow \text{var} : M_2 \Rightarrow 707777 \vee 770777 \vee 777077 \vee 777707 , \quad (9)$$

Here  $F$  and  $W$  are the motion parameters of the tool and workpiece.  $M_2$  is a subset that fulfils the second extraction condition.

3. To increase the stiffness, configurations, in which linear moving unit is attached to rotating unit (moving-out quill) should be avoided 0. Important elements for the neural network's learning set are the positions of the digits "0", "4" and "6" in the structure's configuration's code, which exclude the possible combination of the digits "36" and "41". Accordingly, the logical equation for this condition is as follows:

$$\forall_{\square} B \exists_{\square} I P = \emptyset : M_3 \Rightarrow 677774 \vee 067774 \vee 677740 . \quad (10)$$

Here  $P$  represents a motion parameter of the quill.  $\emptyset$  describes an empty set.  $M_3$  is a subset that fulfils the third extraction condition.

4. In order to avoid the weight effect of mobile units on the accuracy of the machine tool, horizontal mobile units should be attached to immobile

units 0. Accordingly, there should be a combination of the numbers "102" or "201" in the structure's configuration's code. Then, the logical equation for the fourth condition can be described as follows:

$$\forall_{\square} B \exists_{\square} I U_M \Leftrightarrow U_S : M_4 \Rightarrow 710277 \vee 720177 \vee 771027 \vee 772017 . \quad (11)$$

Here  $U_m$  represents a condition parameter of mobile units and  $U_S$  – a condition parameter of immobile units.  $M_4$  is a subset that fulfils the fourth extraction condition.

5. The last extraction condition is obtained by the combination of the previously formulated four conditions (8-11):

$$\forall_{\square} B \exists_{\square} I : M_5 \Rightarrow M_1 \wedge M_2 \wedge M_3 \wedge M_4 , \quad (12)$$

Here  $M_5$  is a subset that fulfils the fifth extraction condition.

If the machine tool structure's configuration fulfils the fifth condition than it is optimal.

Additional conditions can be added to and/or excluded from the formulated extraction conditions. In the first case, the subset of the optimal configurations increases, and in the second case, it decreases. The decision as to which conditions should be added or excluded is taken by the user or engineer at the current state of technology.

Based on the formulated conditions or logical equations (8 – 12), the input vectors (6) are generated. For the first extraction condition (8), for example, the following vectors of the learning set are received:

$$\mathbf{p}_1 = 6 \ 7 \ 7 \ 7 \ 7 \ 7 ; \mathbf{p}_2 = 7 \ 6 \ 7 \ 7 \ 7 \ 7 ; \mathbf{p}_3 = 7 \ 7 \ 6 \ 7 \ 7 \ 7 . \quad (13)$$

By assigning the vectors (13) to a class  $c_i$  in the target vector  $\mathbf{T}_C$  (7), it is ensured that they are bound to a certain extraction condition, i.e. for the first condition  $c_i = 1$ , for the second condition  $c_i = 2$  etc. Accordingly, the vectors  $\mathbf{p}_1$ ,  $\mathbf{p}_2$  and  $\mathbf{p}_3$  are assigned to the same class  $c_1 = c_2 = c_3 = 1$ . Analogue to that, all other input vectors  $\mathbf{p}$  are assigned to the classes in the target vector  $\mathbf{T}_C$ , according to the logical equations (9-12). Then, the connectivity matrix  $T$  (5) is formed.

A radial-basis-function (RBF) network, modelled in Matlab, was used for learning. Such RBF networks can effectively solve the tasks of generalisation and classification of vectors, since they have a large number of neurons, compared to the standard networks with direct transmission of signals and reverse spreading of errors 0. Figure 3 shows a structure scheme of the modelled RBF network for the extraction of the optimal machine tool structure's configuration.

The network consists of two layers: an RBF layer with an activating function  $radbas(n)=e^{-n^2}$  and  $S_1$  neurons as well as a linear output layer with an activating function  $purelin(n)=n$  and  $S_2$  neurons.

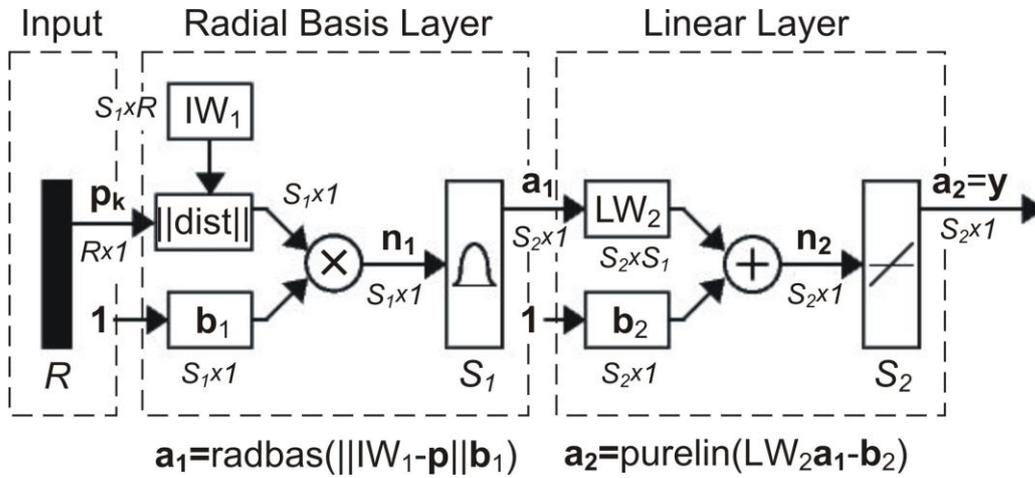


Figure 3 – Structure diagram of the neural network

During the learning with the connectivity matrix  $T$ , weight matrices are formed for the first  $IW_1$  and second layer  $LW_2$ . In the first layer, a distance between the new input vector  $\mathbf{p}_k$  and the vectors of the learning set is determined. In this process, the data of the vector  $\mathbf{p}_k$  is transmitted to the block  $\|\text{dist}\|$ . In this block, the distance between the vector  $\mathbf{p}_k$  and the weight matrix  $IW_1$  is determined. The output data of the block  $\|\text{dist}\|$  is multiplied element by element with a displacement vector  $\mathbf{b}_1$ . Their product forms the input data of the activating function  $radbas$ . If the output of the activating function – vector  $\mathbf{a}_1$  – is a number close to „1“, the new vector  $\mathbf{p}_k$  is the closest to the vector of the learning set 0. In the second layer, it is determined to which class the vector  $\mathbf{p}_k$  should be assigned to. The output vector  $\mathbf{a}_1$  is multiplied with the weight matrix  $LW_2$ . Their product is summed with the displacement vector  $\mathbf{b}_2$ . The sum is the input data of the activating function  $purelin$ . The output of this function – vector  $\mathbf{a}_2$  – takes the value of the class to which the new vector  $\mathbf{p}_k$  is assigned by the neural network 0.

The displacement vectors  $\mathbf{b}_1$  and  $\mathbf{b}_2$  provide a possibility to correct the sensitivity of the neurons in corresponding layers. The user can change the values of the displacement vectors' elements 0. The input vectors  $\mathbf{p}_k$  of the neural network include all 198 possible machine tool structure's configurations, which correspond to the coordinate code (2), and are created analogue to the vectors of the learning set (13).

The configurations of the gear milling machine with the coordinate code (2) fulfil the fifth extraction condition (12). Therefore, they are the most suitable

for the machining of medium size workpieces. One of these optimal machine tool configurations, which corresponds the code 602134, is shown in Figure 4 on the right side.

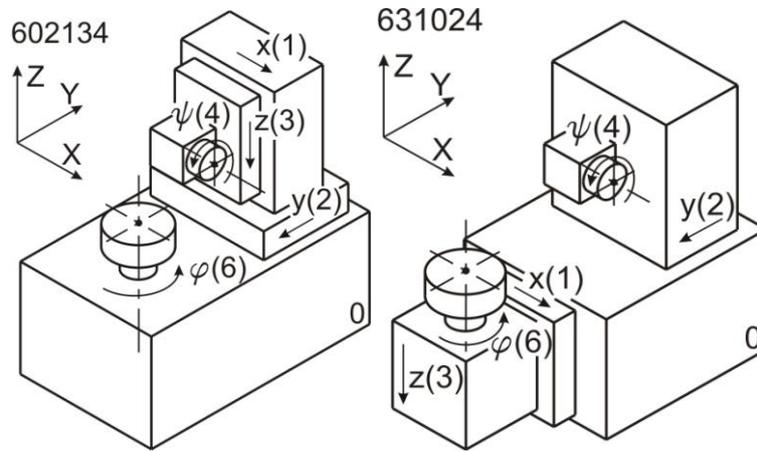


Figure 4 – Examples of the identified optimal configurations of the machine tool structure

To test the operating mode of the developed algorithm and programme more, optimal structure's configurations were extracted for a hobbing machine with the same coordinate code (2), but in the case of machining of large gear wheels. The learning data of the neural network will differ from the previous learning data in three conditions:

1. The second extraction condition is re-formulated as follows: The workpiece can make only one movement or be immobile, because the displacement of the large masses causes an enormous energy consumption and reduce the efficiency 0. Hence, the logical equation is as follows:

$$\forall_{\square} B \exists_{\square} I \quad W = 1 \vee const : M'_2 \Rightarrow 077777 \vee 707777 . \quad (14)$$

2. The fourth extraction condition is modified as follows: In order to avoid the weight effect of the units on the accuracy of the machine tool, the horizontal mobile unit, which performs the largest displacements, should be attached to the immobile units 0. Therefore:

$$\forall_{\square} B \exists_{\square} I \quad U_{M \max} \Leftrightarrow U_S : M'_4 \Rightarrow \left. \begin{array}{l} 702777 \vee 770277 \vee 777027 \\ \vee 720777 \vee 772077 \vee 777207 \end{array} \right\} . \quad (15)$$

3. The fifth condition is formulated analogue to equation (12), but with the logical equations (8), (10), (14), (15):

$$\forall_{\square} B \exists_{\square} I : M'_5 \Rightarrow M_1 \wedge M'_2 \wedge M'_3 \wedge M'_4 . \quad (16)$$

### CONCLUSIONS

The algorithm described above allows an automated development of machine tools in the phase of selecting of the optimal structure's configuration by

means of neural networks. The results of the operating tests of the developed neural network correlate with the manual calculations if the structural extraction conditions were correctly formulated. The learning ability of the neural network guarantees high flexibility of the algorithm in solving new tasks and also in optimising of existing machine tool structure's configurations. No direct changes are required in the programme or in its data base if the extraction conditions are changed.

As a further development of the algorithm and programme, the structure equations should be generalised for all types of machine tools. These equations should be entered into a data base of learning sets. This will considerably reduce the calculation time.

**References:** **1.** *Averjanov, O. I.*: (1987) The modular principle of machine tools with CNC building. Machine building, Moscow, 232 p. **2.** *Dayhoff, J.*: (1990) Neural Networks. Van Nostrand Reinhold, New York. **3.** *Inasaki, I.; Kishinami, K.; Sakamoto, S.; Takeuchi, Y.; Tanaka, F.*: (1997) Shape Generation Theory of Machine Tools. Yokendo Press. **4.** *Ito, Y.*: (2008) Modular design for machine tools. McGraw Hill, New York, 504 p. **5.** *Ito, Y.; Shinno, H.*: (1990) Structural Description of Machine Tools. Transactions of JSME Series C 46(405), pp. 562–571. **6.** *Iwata, K.; Sugimura, N.; Peng, L.*: (1990) A Study of the Fundamental Design of Machine structure for Machining. Transactions of JSME Series C 56(523), pp. 803–809. **7.** *Jain, A.K.; Mao, J.; Mohiuddin, K.M.*: (1996) Artificial Neural Networks: A Tutorial, Computer, Vol.29, No.3, pp. 31–44. **8.** *Kudinov, A. V.*: (2001) Features of neural network modeling tools. Machine and Tool, No. 1, pp. 13 - 18. **9.** *Medvedev, V. S.; Potemkin, V. G.*: (2002) Neural networks. MATLAB 6. DIALOG, Moscow, 496 p. **10.** *Moriwaki, T.*: (2008) Multi-functional machine tool. Annals of the CIRP 57(1), pp. 736–749. **11.** *Moriwaki, T.; Nunobiki, M.*: (1992) Object-oriented Design support System for Machine Tools. Transactions of JSME Series C 58(546), pp. 655–660. **12.** *Portman, V.; Inasaki, I.; Sakakura, M.; Iwatate, M.*: (1998) Form-shaping System of Machine Tools: Theory and Applications. Annals of the CIRP 47(1), pp. 329–332. **13.** *Patan, K.*: (2008) Artificial neural networks for the modeling and fault diagnosis of technical processes. Springer, Berlin, Heidelberg, 206 p. **14.** *Reshetov, D. N.; Portmann, V. T.*: (1988) Accuracy of machine tools. ASME, New York, 304 p. **15.** *Rey, G. D.; Wender, K. F.*: (2011) Neuronale Netze: Eine Einführung in die Grundlagen, Anwendungen und Datenauswertung. 2. Auflage, Huber, Bern, 205 S. **16.** *Rutkowskaja, D.; Pilinskij, M.; Rutkowskaja, L.* (2006) Neural networks, genetic algorithms and fuzzy systems. Telekom, Moscow, 452 p. **17.** *Shinno, H.; Ito, Y.*: (1987) Computer Aided Concept Design for Structural Configuration of Machine Tools: Variant Design Using Directed Graph. Transactions of ASME Journal of Mechanism Transmissions and Automation in Design (109), pp. 372–376. **18.** *Spicer, P.; Koren, Y.; Shpitalni, M.; Yip-Hoi D.*: (2002) Design Principles for Machining System Configurations. Annals of the CIRP 51(1), pp. 275–280. **19.** *Vragov, Yu. D.*: (1978) Analysis of machine tools configurations. (Fundamentals of componetik). Machine building, Moscow, 208 p. **20.** *Weck, M.; Brecher C.*: (2006) Werkzeugmaschinen. In 6 Bänder, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.

# ОРГАНІЗАЦІЯ ВИРОБНИЦТВА: ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ

UDK 621.91

*O. ABDUL RAHMAN, J. JAEGER,  
C. CONSTANTINESCU, Stuttgart, Germany*

## SYNCHRONOUS METHOD AND ENGINEERING TOOL FOR THE STRATEGIC FACTORY PLANNING

*О. АБДУЛ РАХМАН, ДЖ. ДЖАЕГЕР, К. КОНСТАНТИНЕСКУ  
СИНХРОНИСТИЧНИЙ МЕТОД І ІНСТРУМЕНТАРІЙ СТРАТЕГІЧНОГО  
ВИРОБНИЧОГО ПЛАНУВАННЯ*

Ця стаття представляє комбінований підхід, у рамках якого використовуються два вихідних методи й реалізуючий їх інструментарій, а саме "Планування капіталовкладень і продуктивності підприємства" і "Ідеальне виробниче мережеве планування доданої вартості". Кінцевими цілями синхроністичного методу є підтримка підприємств як у стратегічному плануванні, так і в мережевому. Відповідним інструментарієм є використовуваний для планування ціни, стимулювання збуту, завантаження виробничих потужностей і виробничих витрат у розгляді різних виробничих сценаріїв розподілу динамічних і стохастичних аспектів. Значимість результатів показана поданням реалізації сценарію з використанням синхроністичного методу й інструментарію.

*Ключові слова:* визначення продуктивності підприємства, сіткове планування виробництва, критерій оцінки.

Эта статья представляет комбинированный подход, в рамках которого используются два исходных метода и реализующих их инструментария, а именно «Планирование капиталовложений и производительности предприятия» и «Идеальное производственное сетевое планирование добавленной стоимости». Конечными целями синхронистического метода является поддержка предприятий как в стратегическом планировании, так и в сетевом. Соответствующим инструментарием является используемый для планирования цены, стимулирования сбыта, загрузки производственных мощностей и производственных затрат в рассмотрении различных производственных сценариев распределения динамических и стохастических аспектов. Значимость результатов показана представлением реализации сценария с использованием синхронистического метода и инструментария.

*Ключевые слова:* определение производительности предприятия, сетевое планирование производства, критерий оценки.

This paper presents the approach to combine two reference methods and engineering tools, for «Factory Performance and Investment Planning» as well as «Value Added Ideal Production Network Planning». The resulted synchronous method aims to support factories in the strategic planning as well as in the network planning. The corresponding engineering tool is employed for assessment planning, sales planning, capacity planning and production costs planning under the consideration of dynamic and stochastic aspects of different production scenarios. An implementation scenario of the synchronous method and engineering tool is presented to demonstrate the relevance of the results.

*Keywords:* Factory performance planning, production network evaluation, value creation.

## **1 INTRODUCTION**

Today's manufacturing enterprises in all industrial sectors are confronted with bigger market challenges than in the past. The markets getting global, goods and services are available all over the world within a short period of time. These circumstances increase the market challenge pressure for manufacturing enterprises worldwide [1]. To meet the customer needs, the products have to be cost effective as well as delivered in short period and simultaneously in terms of high reliability. The approach of the synchronous method and engineering tool for the strategic factory planning and network planning provides a large share to master them successfully. Therefore the approach combines two reference methods and engineering tools, for "Factory Performance and Investment Planning" as well as "Value Added Ideal Production Network Planning" developed by the Fraunhofer Institute for Manufacturing Engineering and Automation (IPA). These engineering tools can be used independently within the factory life cycle.

This new approach allows the holistic view of the manufacturing enterprises production network at different scales, starting at the level of the network on the top, down to the machines and work places on the bottom of the planning view. The two combined engineering tools are sharing a database exchange, which is accessed from both engineering tools synchronal. In order to realize this sharing of the database exchange, it is possible to configure the synchronization between the tools. The key performance indicators calculated in the Factory Performance and Investment Planning are available as input for the Value Added Ideal Production Network Planning and vice versa.

For the strategic planning and value added ideal creation of a manufacturing enterprises production network, multiple planning scenarios alternatives are developed, implemented into holistic models and finally benchmarked and evaluated. These alternative planning scenarios are examined in terms of technique and economic aspects. The combined method and engineering tool considers various uncertainties as well as dynamic aspects and its temporal trend. The results are technical and monetary statements to production network costs as well as their factory performance units. Furthermore each of the two reference methods and engineering tools is a high potent support in strategic factories planning and the related decision making process.

## **2 REFERENCE METHOD AND ENGINEERING TOOL FOR FACTORY PERFORMANACE AND INVESTMENT PLANNING – FLIP**

### **2.1 Problem statement**

The factory performance planning takes into consideration factory long term objectives as well as the requirements of the working personal and the environment [2].

The evaluation of the factory performance as a basis of replanning is therefore taking into account various aspects. Among these, one is to capitalize the opportunities of the digital engineering systems, and in particular the simulation applications, in order to answer to questions regarding the capacity distribution, the on time delivery synchronization, the employment development or the impact of rationalization measures [2]. The product market strategies of manufacturing enterprises, the so called factories, are usually the base for the development of the production. In the strategic planning, the financial data for product development, the capacity and investments are established. The performance planning needs the development of a technical concept for the production, including the expected product and production technologies [2].

## **2.2 State of the art**

Several systems exist to support the engineering in various planning phases of the factory planning e.g. [3, 4]. Missing is an engineering tool for the support of the strategic factory planning in terms of factory performance planning and value added ideal production network planning. The strategic factory planning has been approached by the research works of Grundig [5], Pawellek [6] and Wiendahl [7]. Although each research work considers the strategic factory planning there is a lack of a continuous systematic methodology for the factory performance and investment planning.

## **2.3 Motivation**

During the strategic factory planning the economic framework for the product development as well as for the production capacities and investments are defined. To get significant decisions during the strategic factory planning there has to be designed a technique production concept, including the expected product and production technologies. Therefore the IPA developed the reference methodology and engineering tool for the synchronous factory performance and investment planning.

## **2.4 Requirements**

To get a realistic and systematic support for the factory performance and investment planning, the methodology and engineering tools should be able to take into account the effects of conception and rationalization activities at performance units synchronous. In the context of multiscale factory [8, 9], the factory performance unit is approached at production sites, production segments, production systems, production cells, as well as machines and workplaces. The viewing frame of the performance unit is therefore scalable to meet the individual necessary requirements. Thus, it is possible to decompose complex performance units in components and bring them together again after their successful analysis.

## 2.5 FLIP Systematics

The approach for the reference methodology and engineering tool for Factory Performance and Investment Planning is to divide the planning procedure into two synchronized planning levels and eleven planning steps. The planning levels are processed parallel and include planning level overlapping links of the particular planning steps, as shown in Figure 1. Through the adaption of the key performance indicators for the two planning levels, multiple planning scenarios are generated, iteratively optimized as well as analysed and evaluated for the assessment of the planning scenarios.

The first level takes into account the technique planning. Therefore the utilization time, the capacity inventory, the personal planning and the loading of the performance unit are considered. The second level is regarding the economic planning level. This economic planning level takes into account the production cost of the performance unit by considering the cost and performance indicators of efficiency analysis as required in the factory.

## 2.6 FLIP Workflow

The workflow of activities and steps required to be achieved are in the following presented:

1. Creation of the process overview;
2. Coordination of the key performance indicators from marketing, sales, production and management;

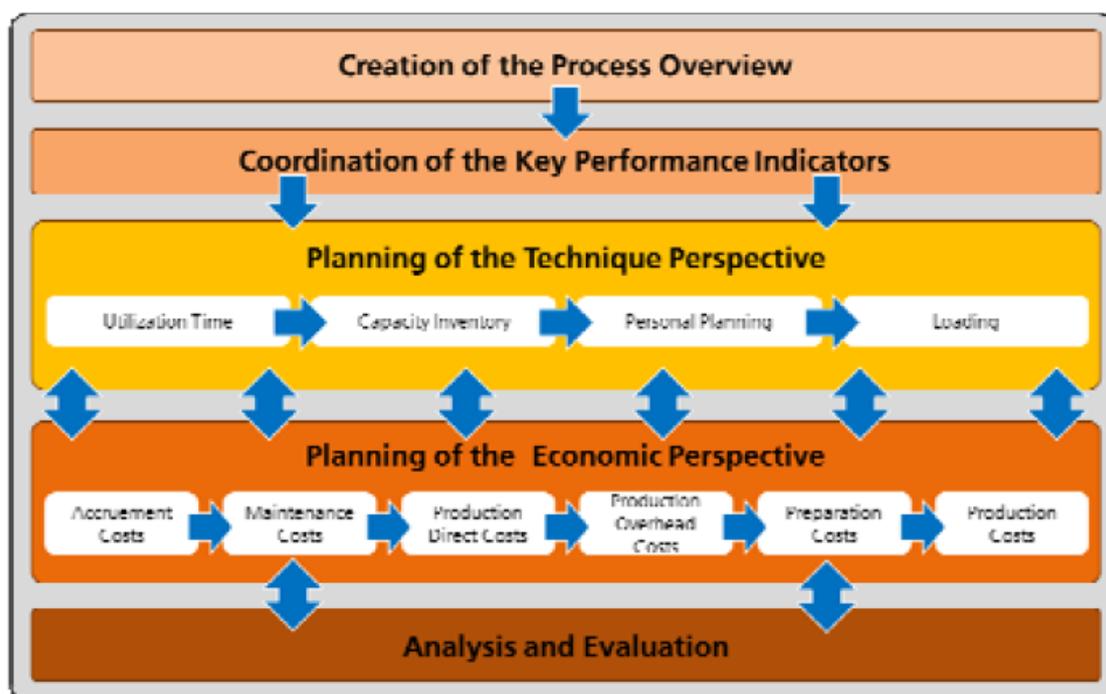


Figure 1 – FLIP Systematic

3. Monitoring and evaluation of: a. Technique performance indicators, e.g.: Performance unit cycle time, utilization time, manpower requirement, capacity inventory and loading b. Economic performance indicators, e.g.: Performance unit installation costs, commissioning costs, personal costs, profitability and payback period.

4. Analysis and evaluation.

### **2.7 Benefits**

The results are monetary statements to life cycle costs, production costs and performance of factory performance units. The benefits are the following:

- The holistic and synchronous consideration of costs and performance already during the strategic factory planning;
- The analysis and evaluation of technique and economic planning alternatives as well as the utilization analysis of multiple planning scenarios.

## **3 REFERENCE METHOD AND ENGINEERING TOOL FOR VALUE ADDED IDEAL PRODUCTION NETWORK PLANNING – VPRONET**

### **3.1 Problem statement**

The globalization of markets and the related competitive pressure are permanently increasing [10]. This provides manufacturing enterprises and their managers with huge challenges [11]. To meet these challenges, manufacturing enterprises have to be present locally with their own capacity in almost all markets, thereby greatly increasing the complexity in the production networks. This leads to an increasing importance of location and network planning with the goal of flexible and cost effective distribution of the value creation [12, 13]. The significant efforts for the reduction as well as the decrease of the necessary investments are required to enable these companies to select the value added ideal production network.

### **3.2 State of the art**

The ideal connection of the different production sites is a critical point in assuring the competitiveness of manufacturing enterprises. Researches have already addressed the complexity of planning production networks with mathematical or electronic support in the early 90s. Hagedorn [14] developed one of the first models to handle new production capacities in production network. The model divides a production network into two levels, the production site level as well as the headquarter level. By dividing the network into these levels Hagedorn generated a simulation model to analyze the future changes in the production program, as presented in Figure 2.

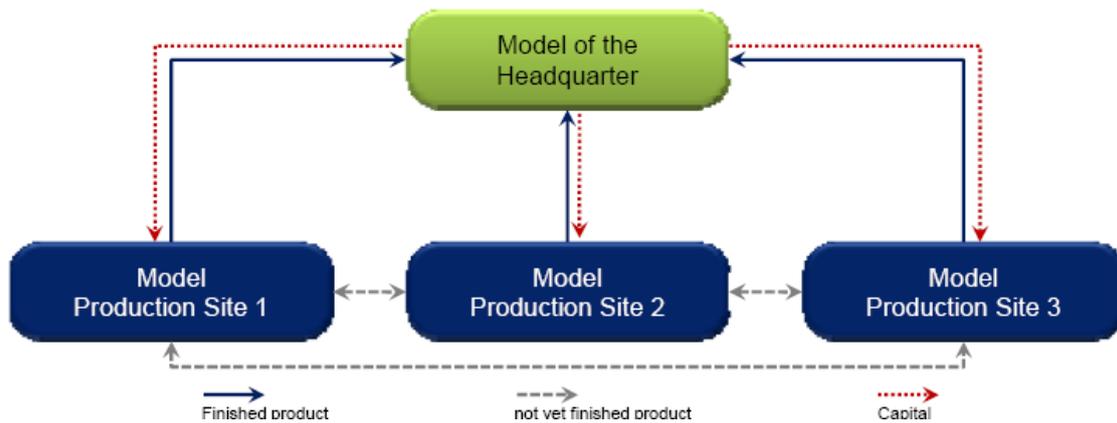


Figure 2 – Two network level definition (adapted from [14])

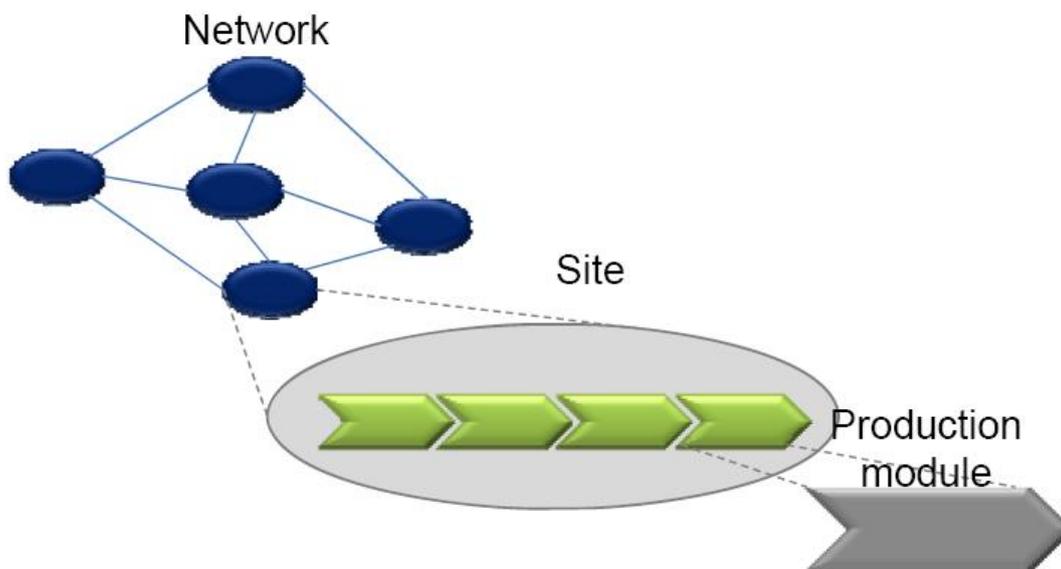


Figure 3 – Definition of Different network level [16]

Schellberg [15] and Merchiers [16] adopted the division of networks and extended it to the three. Within the network level, production sites are chosen and their roles are defined. In the site level, the production program of the single production sites is planned while the detailed planning of production processes is connected to the level “production module”, presented in Figure 3.

Nevertheless the general idea of defining different levels is not found in all modern researches. One important work dealing with planning of production networks has been composed by Meyer [17]. He developed a method for designing and evaluation global production networks focused on a quantitative analysis of network costs by using a mathematical optimizing. Other research works as Wunderlich [18] and Kohler [19] focus more on the aspect of analyzing costs at one production site and neglect the extension to production networks.

In conclusion several approaches of research exist which deal with the matter of simulation or mathematical supported planning of networks or with the detailed analysis of cost structures in production sites. Although financial aspects are included in most of the methods, there is to date no method contains all the relevant costs in production networks. Furthermore the aspect of dynamic examination is less addressed as well as the consideration of uncertainly factors; most of the generated methods focus on static optimization.

### 3.3 vProNet Systematics

The flexible and cost optimized distribution of the value creation in production networks depends on three factors: costs, time and quality. These factors influence each other and the optimization of a single factor may adversely affect the other two factors. Therefore, these factors have to be considered parallel. The developed reference method for the production network selection due to the simulation based distribution of the value creation consists of seven phase, shown in Figure 4.

The first phase of this method is the **Analysis**. It builds the basic for further phases and concludes the following steps:

**A1. Product Analysis:** This step aims to analyze the product main parts and modules as well as the parts to be transported.

**A2. Production Network Analysis:** This step analyzes the current status of the production network composed of the network level, site level and the production level and leads to an abstract production network as well as the process structure.

**A3. Cost Structure Analysis:** This analysis requires the costs for producing new products as well as the exchange rate. The costs will be related to the production network as shown in Figure 5. The dynamic trend of these costs will be taken also into account.

**Modeling** is the second phase of this reference method. Based on the results of the previous phase a simulation model will be developed and implemented according to the “top down” strategy. In this model various uncertainly factors and dynamic factors as well as their trend have to be presented.

The third phase is the **Scenario Development** and addresses the link between the sites. This phase consists of the following steps:

**SD1. Development of production scenarios:** Different goal and evaluation criteria have to be defined within this step. Based on these criteria, production scenarios will be developed and parameterized.

**SD2. Mapping of production scenarios:** the developed scenarios will be mapped in the previously developed simulation model with low complexity.

The fourth phase is called **Simulation**. One more, simulation studies will be accomplished. The results of this phase will be visualized and exported as well as used in the following phases. The fifth phase evaluation consists of two steps:

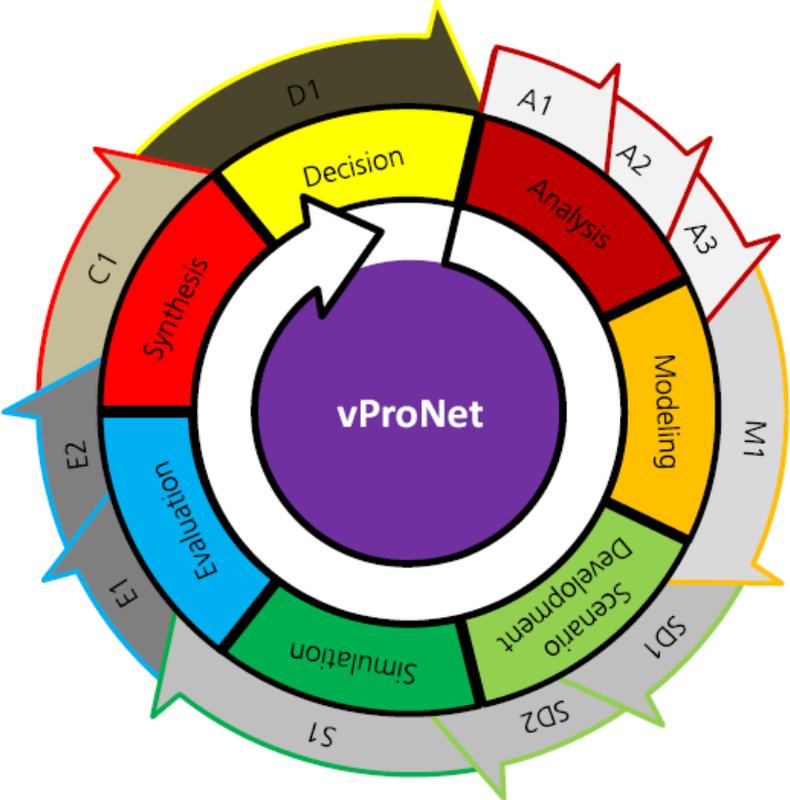


Figure 4 – vProNet phases

**E1. Weighting the goal criteria:** Using an utility analysis, qualitative as well as quantitative evaluation criteria are compared to each other and weighted.

**E2. Multi criteria evaluation:** The various production scenarios will be evaluated according to the weighted criteria above.

The sixth phase **Synthesis** compares the results of different simulation studies taking into account the goal and evaluation criteria as well as the degree of performance. The last phase is the **Decision**. Within this phase and based on the results of the previous phases, the value added ideal production network will be selected.

**3.4 Benefits**

Besides the evaluation of dynamic production networks, this method offers a user friendly and library based simulation as well as a cost optimized distribution of the value creation.

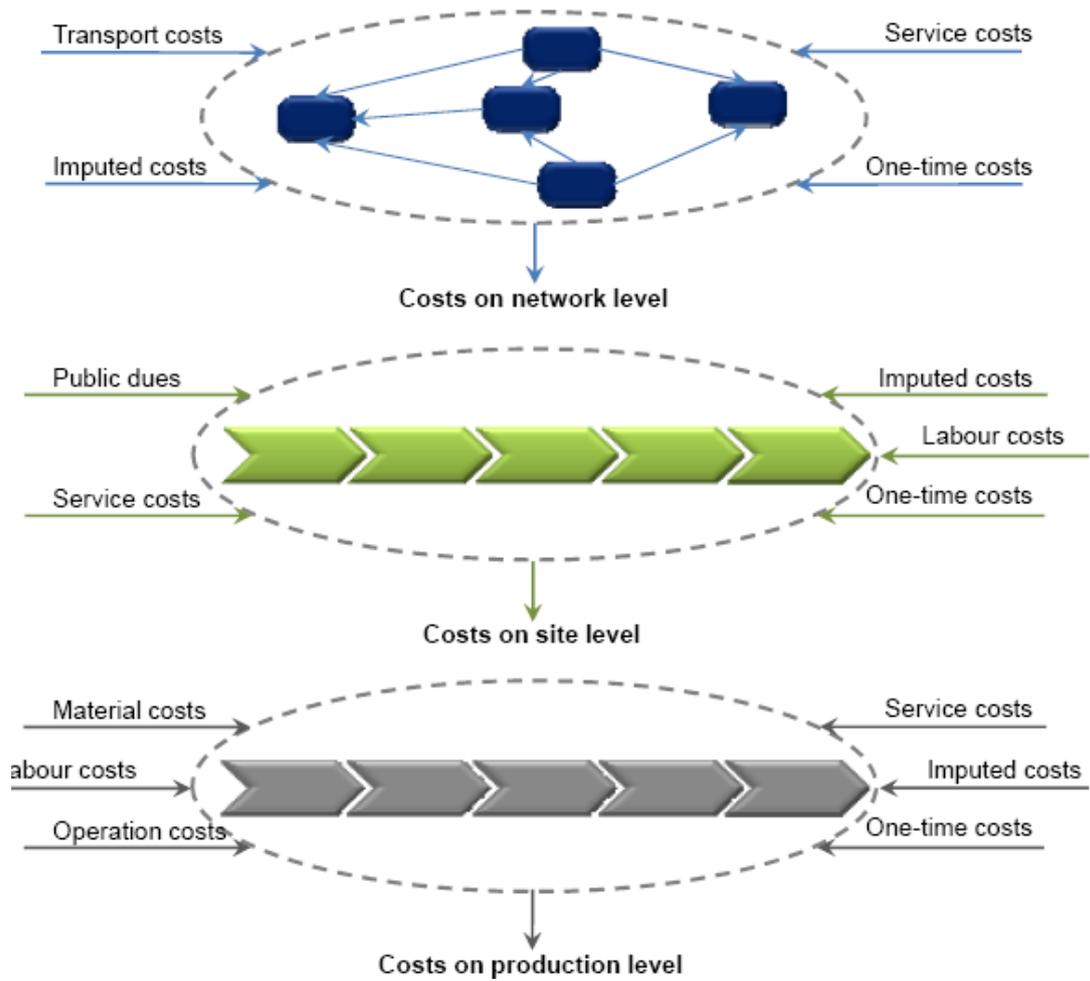


Figure 5 – Costs related to a production network

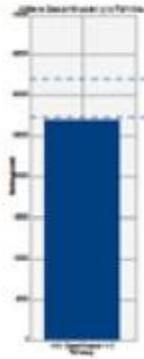
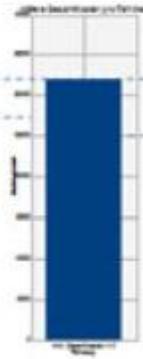
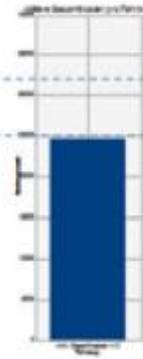
	Units number_in_EU= 543	Units number_in_USA= 385	Units number_in_China= 950
<b>Costs in €</b>	 Mean Costs_EU=270333.145€	 Mean Costs_USA=32037.32€	 Mean Costs_China=24670.02€
<b>Time</b>	Mean Cycle Time_EU=2:01:35.02.34	Mean Cycle Time_USA=9:04:23:17.32	Mean Cycle Time_China=13:14:05:38.46
<b>Quality</b>	Mean Quality Costs_EU=68.861€	Mean Quality Costs_USA=99.904€	Mean Quality Costs_China=93.124€

Figure 6 – Visualisation of the scenario results

## **4 PROTOTYPICAL IMPLEMENTATION**

Both reference methods and engineering tools share a common database, where the common data (e.g. cost structure or key performance indicators) are stored. The rest of the data is stored local.

The combination of both methods is prototypical implemented for a process chain within the automotive industry. The Goal is to calculate the costs and performance of a production network consisting of three sites (EU, USA and China) as well as the ideal value added distribution. Therefore, several scenarios are modelled, simulated and evaluated regarding the Magical Triangle criteria costs, time and quality. Figure 6 shows the visualisation of the results of this implementation scenario.

## **5 SUMMARY**

The upcoming challenges for manufacturing enterprises as globalization, flexibility and adaptability in today's and future markets lead to the customer needs of high potent support in strategic factory planning and the related decision making process. The IPA approach to combine two reference methods and engineering tools, for »Factory Performance and Investment Planning« as well as »Value Added Ideal Production Network Planning« has the aim to support the strategic factory planning of the manufacturing enterprises. The presented approach regards factory long term production network and factory performance objectives as well as the requirements of the working personal and the environment. Therefore different technique and economic key performance indicators have to be taken into account e.g. technical performance and labour cost in different countries, regions and cities as well as various market requirements and legal regulations. Based on these indicators different planning scenario alternatives are developed and evaluated regarding quantitative and qualitative criteria.

## **6 ACKNOWLEDGEMENTS**

The authors thank Professor Engelbert Westkämper and Mr Axel Bruns for motivation us to work in this field and to giving us advice in the implementation phase.

**REFERENCES:** 1. *Westkämper, E.*, 2006, Digitale Produktion - Herausforderung und Nutzen. In: Heisel U. [Hrsg]: FTK 2006 - Fertigungstechnisches Kolloquium Stuttgart, Stuttgart, Germany. 2. *Westkämper, E.*, 2008, Fabrikplanung vom Standort bis zum Prozess, Konfe-

renzbeitrag des Deutschen Fachkongresses Fabrikplanung, 28-29 October, Ludwigsburg, Germany. **3.** *Papakostas, N., Efthymiou, K., Mourtzis, D., Chryssolouris, G.*, Modeling the complexity of manufacturing systems using nonlinear dynamics approaches, 2009, CIRP Annals - Manufacturing Technology 58, p. 437-440, 2009. **4.** *Lalas, C., Mourtzis, D., Papakostas N., and Chryssolouris, G.*, A Simulation-Based Hybrid Backwards Scheduling Framework for Manufacturing Systems, International Journal of Computer Integrated Manufacturing, (Vol. 19, No. 8, 2006), pp. 762-774 **5.** *Grundig, C.-G.*, 2006, Fabrikplanung. Planungssystematik – Methoden – Anwendungen, 2. aktualisierte Auflage, Hanser, München, Germany. **6.** *Pawellek, G.*, 2008, Ganzheitliche Fabrikplanung: Grundlagen, Vorgehensweise, EDV-Unterstützung. Springer, Berlin, Germany. **7.** *Wiendahl, H.-P., Reichardt, J., Nyhuis, P.*, 2009, Handbuch Fabrikplanung - Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten. Hanser, München, Germany. **8.** *Scheibe, A., Constantinescu, C., Decker, M., Ye, Q., Westkämper E.*, 2006, A comprehensive and holistic approach of multi-scale modeling and simulation of manufacturing systems. In: The 6<sup>th</sup> International Workshop on Emergent Synthesis, IWES06, 18-19 August, Kashiva, Japan, p. 205-211. **9.** *Westkämper, E., Constantinescu, C., Hummel, V.*, 2006, New paradigms in Manufacturing Engineering: Factory Life Cycle. In. Annals of the Academic Society for Production Engineering. Research and Development, XIII/1, Volume XIII, Issue 1, p. 143-147. **10.** *Risse, J.*: Time-to-Market-Management in der Automobilindustrie: ein Gestaltungsrahmen für ein logistikorientiertes Anlaufmanagement. Haupt, Bern 2003, ISBN 3258066566. **11.** *Klöpfer, R.*: Konfiguration der internationalen Produktionswertschöpfungskette. Eul, Lohmar 2000, ISBN 3890127533. **12.** *Fleischer, J., Herm, M., Schell, M.-O.*: Wertschöpfung in Netzwerken – Integrierte Planungsmethodik zur Konfiguration von globalen Produktionsnetzwerken; in *ZwF – Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, Jahrgang 99 (2004), Heft 9, S. 470-476. **13.** *Kinkel, S., Lay, G., Jung Erceg, P.*: Produktionsverlagerungen und Auslandsproduktion im deutschen verarbeitenden Gewerbe-Stand, Trend, Motive und Effekte, in *Kinkel, S.*: Erfolgsfaktor Standortplanung: in- und ausländische Standorte richtig bewerten, Springer, Berlin, 2004, S. 17-31. **14.** *Hagedorn, A.*: Modellgestützte Planung und Kontrolle von Produktionsstandorten. Univ., Diss.– Hildesheim, 1992, Dt. Univ.-Verlag, Wiesbaden. **15.** *Schellberg, O.*: Effiziente Gestaltung von globalen Produktionsnetzwerken. Techn. Hochsch., Diss.– Aachen, 2002. Shaker, Aachen, 2002. **16.** *Merchiers, A.*: Bewertung globaler Standortstrukturalternativen im Maschinenbau. Techn. Hochsch., Diss.–Aachen, 2008, Apprimus-Verlag, Aachen. **17.** *Meyer, T.*: Globale Produktionsnetzwerke. Ein Modell zur kostenoptimierten Standortwahl. Techn. Univ., Diss.–Darmstadt, 2005. Shaker, Aachen. **18.** *Wunderlich, J.*: Kostensimulation. Simulationsbasierte Wirtschaftlichkeitsregelung komplexer Produktionssysteme. Meisenbach, Bamberg, Erlangen, 2002. **19.** *Kohler, U.*: Methodik zur kontinuierlichen und kostenorientierten Planung produktionstechnischer Systeme. Techn. Univ., Diss.–München, 2007. Utz, München, 2008.

**В.Д. ГОГУНСКИЙ**, д-р техн. наук,  
**А.Ф. САФОНОВА**, канд. техн. наук,  
**И.И. СТАНОВСКАЯ**, Одесса, Украина

## **АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ РАСПИСАНИЯ ЗАМКНУТЫХ СИСТЕМ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ**

Запропонована модель процесу автоматизованого проектування розкладу подій у замкнених системах масового обслуговування. Технологія моделювання розглянута на прикладі проектування розкладу вищого навчального закладу, що працює за кредитно-модульною системою. Автоматизована система проектування розкладу за допомогою запропонованих 4D-матриць враховує заміну викладачів і дисциплін відповідно до навчального плану при переході до кредитно-модульної системи; змушені заміни викладачів, аудиторій протягом семестру, тощо.

Предложена модель процесса автоматизированного проектирования расписания событий в замкнутых системах массового обслуживания. Технология моделирования рассмотрена на примере проектирования расписания высшего учебного заведения, работающего по кредитно-модульной системе. Автоматизированная система проектирования расписания с помощью предложенных 4D-матриц учитывает замену преподавателей и дисциплин в соответствии с учебным планом при переходе к кредитной модульной системе; вынужденные замены преподавателей, аудиторий на протяжении семестра и т.п.

*V.D. GOGUNSKIJ, A.F. SAFONOVA, I.I. STANOVSKAJA*  
*THE AUTOMATED DESIGNING OF THE SCHEDULE OF THE CLOSED SYSTEMS OF MASS SERVICE*

The model of the automated designing process of the events schedule in the closed systems of mass service is offered. The technology of modeling is considered on an example of the schedule designing of the higher educational institution working on credit modular system. The automated system of the schedule designing by means of the offered 4D-matrixes considers replacement of teachers and disciplines according to the curriculum at transition to credit modular system; the compelled replacements of teachers, audiences throughout a semester, etc.

Большой класс систем, которые сложно изучить аналитическими способами, но которые хорошо изучаются методами статистического моделирования, сводится к системам массового обслуживания (СМО).

В СМО подразумевается, что есть типовые пути (каналы обслуживания), через которые в процессе обработки проходят заявки. Принято говорить, что заявки обслуживаются каналами. Каналы могут быть разными по

назначению, характеристикам, они могут сочетаться в разных комбинациях; заявки могут находиться в очередях и ожидать обслуживания. Часть заявок может быть обслужена каналами, а части могут отказать в этом. Важно, что заявки, с точки зрения системы, абстрактны: это то, что желает обслужиться, то есть пройти определенный путь в системе. Каналы являются также абстракцией: это то, что обслуживает заявки.

Заявки могут приходиться неравномерно, каналы могут обслуживать разные заявки за разное время и так далее, количество заявок всегда весьма велико. Все это делает такие системы сложными для изучения и управления, и проследить все причинно-следственные связи в них не представляется возможным. Поэтому принято представление о том, что обслуживание в сложных системах носит случайный характер.

В то же время, одной из разновидностей замкнутых СМО являются объекты, в которых и поток требований и набор обслуживающих приборов являются конечными, заранее известными множествами, а целью их моделирования служит оптимизация (как правило, многоцелевая) некоторых критериев качества при выполнении многочисленных, зачастую противоречащих друг другу, ограничений [1].

К таким объектам можно отнести параллельные технологические процессы (заявка – деталь, обслуживающий прибор – станок), учреждении транспорта (заявка – транспортная единица, обслуживающий прибор – вокзал), образования (заявка – учебная группа, обслуживающий прибор – специализированное учебное заведение) и многое другое.

Важной особенностью подобных систем является возможность заранее составить (спроектировать) план их работы, т.е. составить расписание обслуживания. Рассмотрим этот процесс на примере проектирования расписания (ПР) высшего учебного заведения, работающего по кредитно-модульной системе (КМС). Для модели модульное деление дисциплин означает ее изменение в заданные моменты времени при каждом завершении модуля учебного плана. Поэтому рассматриваемая модель является дискретной [2], информация о времени ее изменений хранится в изначально определенной базе знаний (БЗ) системы ПР.

Пусть в некотором ВУЗе имеется  $N_g$  учебных групп, в которых работают  $N_v$  преподавателей. Примем следующие обозначения:  $G = \{g_i\}$  – множество учебных групп,  $i = \overline{1, N_g}$ ;  $V = \{v_j\}$  – множество преподавателей,  $j = \overline{1, N_v}$ ;  $T = \{t_k\}$  – множество часовых интервалов,  $\{t_k\} = (t_k^w, t_k^d, t_k^p)$ , где  $t_k^w$  – номер недели,  $t_k^d$  – название дня недели,  $t_k^p$  – номер пары,  $k = \overline{1, N_k}$ ,  $N_k$  – об-

щее количество часовых интервалов. С каждой учебной группой  $g_i$  в течение недели, согласно учебному плану, проводится  $W_i$  занятий,  $i = \overline{1, N_g}$  [3].

Построим пространственную модель автоматизированной системы ПР для данного ВУЗа. Для этого расписание занятий каждого преподавателя  $v_j$  в каждой группе  $g_i$  представим в виде  $2D$ -матрицы, столбцы которой соответствуют дням недели  $t_k^d$ , а строки – номерам пар  $t_k^p$  (рис. 1).

Объединим  $2D$ -матрицы расписаний в общую  $4D$ -матрицу таким образом, чтобы каждая горизонталь полученной четырехмерной матрицы представляла собой последовательность  $2D$ -матриц расписаний всех преподавателей  $v_j$ ,  $j = \overline{1, N_v}$ , для одной из групп  $g_i$ , а вертикаль – последовательность  $2D$ -матриц расписаний всех групп  $g_i$ ,  $i = \overline{1, N_g}$ , для одного из преподавателей  $v_j$ .

		Преподаватель $v_j$				
		Пн	Вт	Ср	Чт	Пт
пара 1						
			группа			
пара 2						
пара 3						
пара 4						

Рисунок 1 –  $2D$ -матрица расписания занятий преподавателя  $v_j$  в группе  $g_i$ .

Особенностью формирования такой  $4D$ -матрицы является способ объединения  $2D$ -матриц. Они присоединяются таким образом, чтобы ячейки с одновременно одинаковыми значениями элементов  $t_k^d$  и  $t_k^p$  были расположены напротив друг друга (рис. 2).

Далее, применяя алгоритм ПР, основной принцип которого заключается в определении занятий, которые могут быть проведены одновременно при последовательной их расстановке, формируем расписание занятий. В результате получаем пространственную модель текущего состояния автоматизированной системы ПР.

Расписание учебных занятий на протяжении семестра может изменяться под влиянием следующих факторов: замен преподавателей и дисциплин в соответствии с учебным планом при переходе к КМС; вынужденных замен преподавателей, аудиторий и т. п.

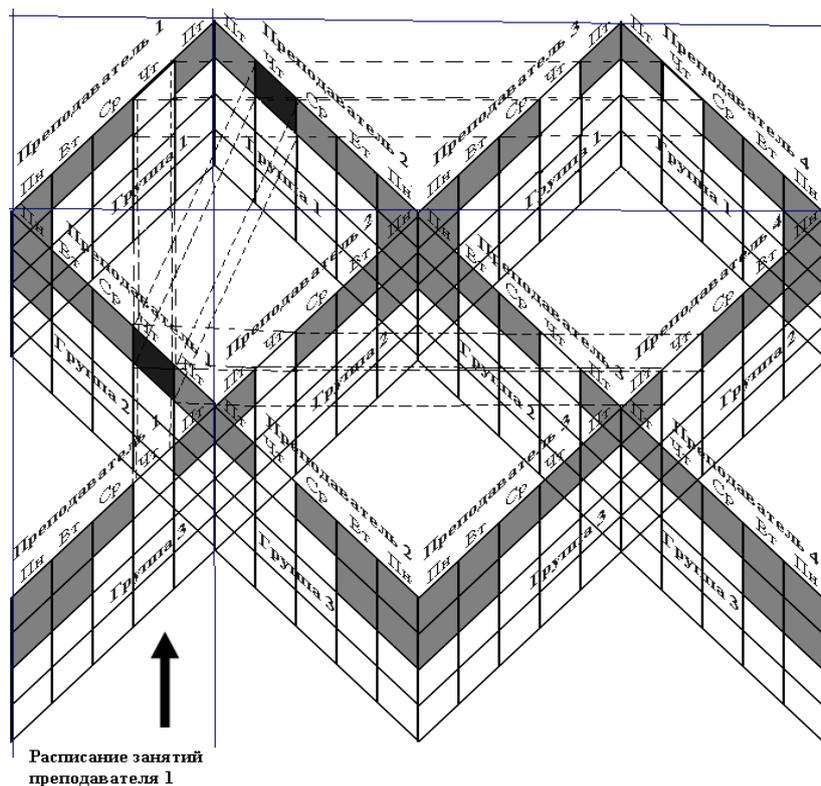


Рисунок 2 – 4D-матрица расписания для случая  $N_g=3, N_v=4$ :  $\square$  – в группе  $g_i$  в день  $t_k^d$  на паре  $t_k^p$  проводится занятие;  $\blacksquare$  – в  $g_i$  в день  $t_k^d$ , пара  $t_k^p$  проводится занятие преподавателем  $v_j$ ;  $\square$  – в  $g_i$  в день  $t_k^d$ , пара  $t_k^p$  занятие преподавателем  $v_j$  не проводится

Автоматизированная система ПР учитывает описанные факторы следующим образом. Добавление в расписание занятий новой группы или преподавателя в модели отображается присоединением к 4D-матрице соответствующих 2D-матриц, благодаря чему новое расписание не противоречит исходному.

Аналогично при удалении из расписания группы или преподавателя, в 4D-матрице убираются соответствующие 2D-матрицы.

Учитывая рассмотренные факторы, а также применяя алгоритм ПР, переведем модель системы из первого состояния во второе (рис. 3), затем в третье и т. д. При этом происходит сохранение каждого текущего состояния модели с возможностью возвращения в предыдущее состояние.

Особенностью построенной пространственной модели автоматизированной системы ПР есть учет динамики замен дисциплин в расписании при КМС. Построенная пространственная модель автоматизированной системы ПР проходила проверку в ОНПУ, где показала следующие положительные качества:

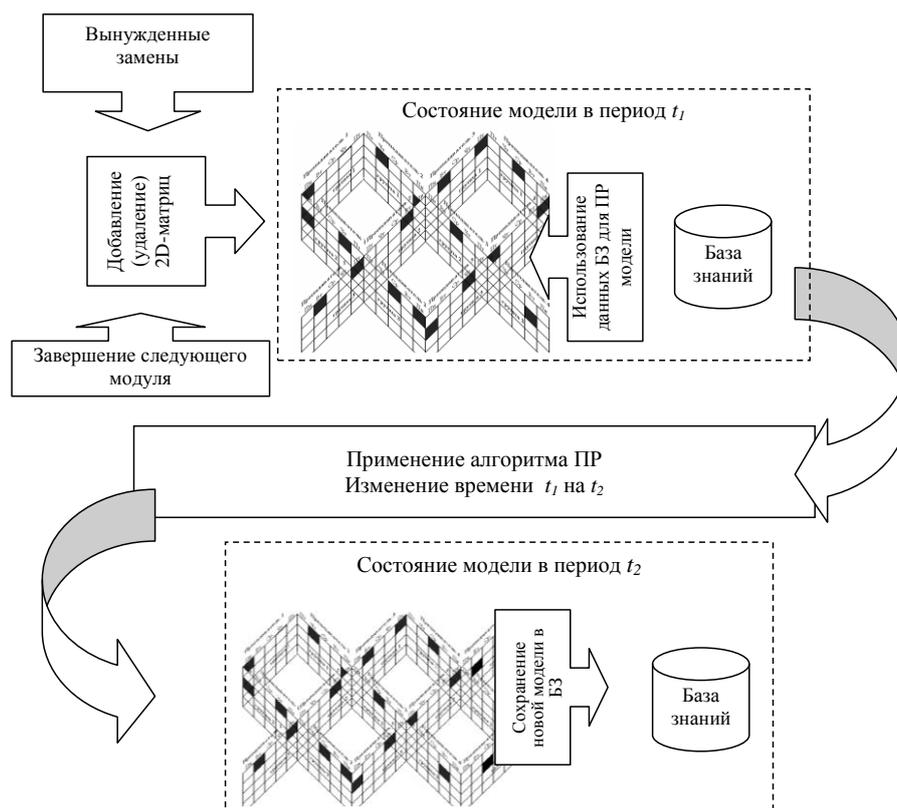


Рисунок 3 – Схема изменения модели системы ПР в дискретные моменты времени

- 1) визуализирует процесс ПР, что позволяет проследить как занятия, которые могут быть проведены одновременно, так и занятия, которые исключают друг друга;
- 2) предотвращает появление «окон» в расписании групп;
- 3) минимизирует количество «окон» в расписании преподавателей;
- 4) учитывает особенности КМС.

**Список использованных источников:** 1. Бочаров П.П. Теория массового обслуживания / П.П. Бочаров, А.В. Печинкин. – М.: РУДН, 1995. – 530 с. 2. Ускач А.Ф., Становский А.Л. Синтез имитационной модели для формирования расписания занятий // Матер. XIV семинара «Моделир. В прикладных науч. исслед.» – Одесса: ОНПУ, 2007. – С. 18 – 20. 3. Ускач А.Ф., Гогунский В.Д., Яковенко А.Е. Модели задачи распределения в теории расписания // Автоматика. Автоматизация. Электрические комплексы и системы. – 2006. – №2(18) – С. 98 – 104.

**Bibliography (transliterated):** 1. Bocharov P.P. Teorija massovogo obsluzhivaniya / P.P. Bocharov, A.V. Pechinkin. – M.: RUDN, 1995. – 530 s. 2. Uskach A.F., Stanovskij A.L. Sintez imitacionnoj modeli dlja formirovaniya raspisaniya zanjatij // Mater. XIV seminaru «Modelir. V prikladnyh nauch. issled.» – Odessa: ONPU, 2007. – S. 18 – 20. 3. Uskach A.F., Gogunskij V.D., Jakovenko A.E. Modeli zadachi raspredelenija v teorii raspisaniya // Avtomatika. Avtomatizacija. Jelektricheskie komplekxy i sistemy. – 2006. – №2(18) – S. 98 – 104.

*А. И. КОВАЛЕВ*, Хмельницкий, Украина

## **ПРОЦЕССНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЕДИНИЧНЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ**

Наведена методологія процесного управління одиничним виробництвом, показники процесу і схема взаємодії з іншими процесами підприємства, також логістичний цикл виконання замовлень одиничного виробництва. Результати роботи можуть бути використані при реалізації вимог процесно-орієнтованих стандартів управління.

Приведена методология процессного управления единичным производством, показатели процесса и схема взаимодействия с другими процессами предприятия, также логистический цикл выполнения заказов единичного производства. Результаты работы могут быть использованы при реализации требований процессно-ориентированных стандартов управления.

*A.I. KOVALEV*

### *PROCESS MANAGEMENT OF INDIVIDUAL MANUFACTURE*

It is given the methodology of process management single part production, indices of the process and scheme of interaction with other processes of enterprise and it is also shown logistic cycle of fulfillment of an order of single part production. The results of work can be used during the realization demands of process-oriented standards of management.

*Постановка задачи.* Общий процесс управления производственными заказами может включать четыре подпроцесса: (1) управления заказами в логистической сети предприятия; (2) управление заказами серийного производства; (3) управления заказами инструментального производства; (4) управления заказами опытного производства. Управление заказами в логистической сети предприятия не связано непосредственно с изготовлением и доставкой готовой продукции конечным потребителям, но способствует более эффективной реализации процедур выполнения заказов. Процесс управления заказами серийного производства осуществляется алгоритмически. В этом случае плановые решения принимаются в условиях полной определенности, с точным знанием целей и ограничений; основное внимание уделяется вопросам оптимизации выполнения производственных планов. Процессы управления заказами инструментального и опытного производств относятся к единичному производству, т.е. к процессам не определенным заранее, и по составу, и по последовательности действий, и по времени [1-3]. Современные системы управления, разрабатываемые на основе требований стандартов ISO серии 9000, должны включать процессы единичного производства – изготовления запасных частей для внутриводского использования и опытных образцов деталей товарной продукции (предназначенных для реализации).

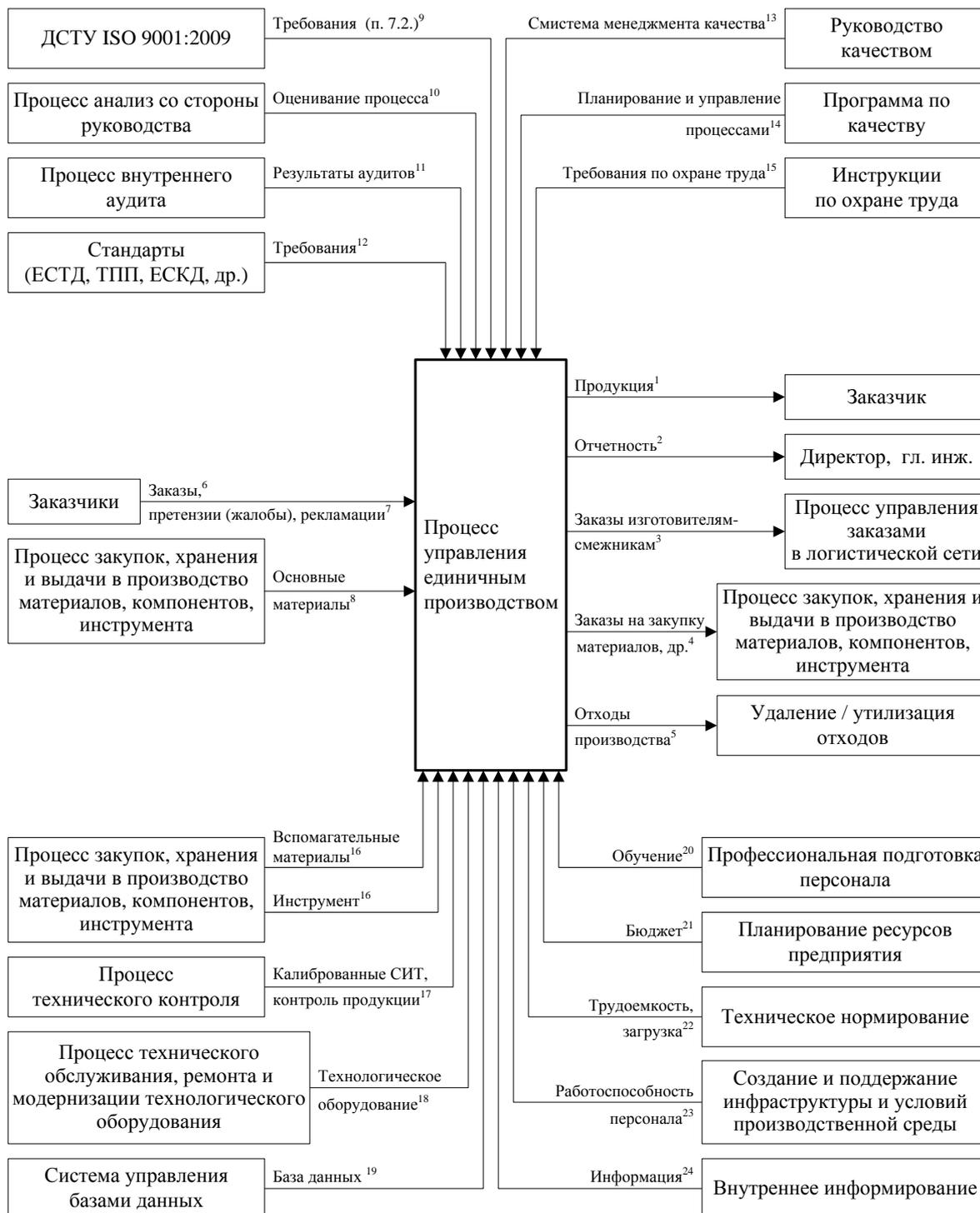


Рисунок 1 – Модель процесса управления единичным производством  
 СМК – система менеджмента качества, СИТ – средства измерительной техники,  
 СУБД – система управления базами данных, РК – руководство качеством,  
 КД – конструкторская документация, ТО – технологическое оборудование,  
 ПП – программные продукты

Настоящая статья представляет порядок выполнения заказов единичного производства и включает описание соответствующего процесса, в

т.ч. актуализацию и расшифровку требований стандарта ДСТУ ISO 9001 и адаптирование этих требований к процессной организации деятельности предприятия. Работа по выполнению заказов единичного производства направлена на *достижение следующих целей*: быстрое выполнение заказов, полная комплектация заказов; предотвращение дефектов; ритмичность производства; достижение и сохранение лояльности заказчиков; полный учет потребностей заказчиков.

*Результаты исследования.* На рис. 1 приведена модель процесса управления единичным производством. Моделирование применяется для того, чтобы идентифицировать потоки всех видов деятельности, образующих процесс и формирующих его границы; установить и согласовать требования потребителей и поставщиков (в т.ч. внутренних). В таблице 1 приведены тексты сносок из рис. 1.

Таблица 1

Сноска, описание	Записи (протоколы качества)
1	2
<b>Выходные потоки</b>	
1. Выборка продукции заказчиком или доставка продукции в место, указанное в маршрутном листе.	Маршрутный лист (подпись заказчика)
2. Анализ системы плановых показателей, характеризующих процесс за период времени.	Отчет по качеству владельца процесса
3. При пиковом спросе потребности заказчиков удовлетворяются путем передачи части заказов смежникам.	Договора с изготовителями – смежникам
4. Стратегия единичного производства (удовлетворение спроса) не предполагает больших производственных запасов.	Страница «Заказы службы снабжения» на локальном сервере предприятия
5. Осуществление операций с отходами: удаление и утилизация.	Журнал учета производственных отходов
<b>Входные потоки</b>	
6. Процесс начинается с оформления заказов. Заказы подвергаются обработке, в результате которой они могут корректироваться.	Страница «Оформить заказ единичного производства» на сервере предприятия
7. Претензия – заявление заказчика об устранении обнаруженных недостатков, неисправности в приобретенном товаре или выполненной работе. Рекламация – претензия, осуществляемая заказчиком в письменной форме, при невыполнении поставщиком обязательств относительно качества.	Страница «Выполненные заказы» СУБД «Заказы единичного производства»
	Отчет по качеству начальника производств. участка.
8. Закупки основных материалов на основе анализа страницы «Закупки месяца» СУБД «Заказы единичного производства» или через страницу «Заказы службы снабжения» на сервере предприятия.	Карточки складского учета материалов (инструмента)

<b>Управляющие воздействия</b>	
9. Анализ установленных заказчиком требований к продукции, а также других необходимых требований. Осуществляются записи анализа требований к продукции и последующих действий, вытекающих из анализа.	Дополнительные записи в технических требованиях чертежей
10. Гл. инженер оценивает пригодность, адекватность, результативность процесса; соответствие продукции; удовлетворенность заказчиков.	Формуляр «Анализ процесса со стороны руководства»
11. Аудит – систематический, независимый и документированный процесс получения свидетельств аудита и объективного их оценивания с целью установить степень выполнения согласованных критериев аудита [4].	Наблюдения аудитов. Заключения по результатам аудитов.
12. Конструкторско-технологическая документация	-
13. Политика и цели в области качества; область применения СМК, включая обоснования исключений; ссылки на документированные процедуры, разработанные для СМК.	-
14. Программа определяет, какие процедуры и соответствующие ресурсы, кем и когда должны применяться к продукции единичного производства. При этом программа содержит ссылки на документированные процедуры процессов или разделы РК.	-
15. Перечень инструкций по охране труда (электронный адрес).	Журнал регистрации инструктажей по вопросам охраны труда
<b>Ресурсное обеспечение процесса</b>	
16. Закупки вспомогательных материалов и инструмента по заявкам.	Страница «Заказы службы снабжения»
17. Выдача и прием СИТ. Операционный контроль продукции (измерительный контроль в объеме требований КД).	Журнал учета СИТ
	База данных калибровки СИТ
	Журнал контроля деталей
	Маршрутный лист (отметка о контроле)
18. Плановый ремонт. Текущий ремонт. Регламентированный ремонт или модернизация.	График планового ремонта
	Журналы по эксплуатации ТО
	Формуляры (паспорта) на ТО
	Договора на покупку
19. Создание СУБД «Заказы единичного производства». Ведение баз данных, защита от преднамеренного / случайного разрушения и искажения, несанкционированного использования.	Журнал контроля ПП
	Журнал исправления ошибок
	Отчет по результатам резервного копирования серверных частей ПП
20. Профессионально-техническое обучение.	Удостоверения
21. Планы доходов и расходов (количество располагаемых и расходующихся денежных средств и их взаимного соответствия).	Папки «Состояние банковских счетов», «Дебиторская / кредиторская задолженность»

<p>22. Трудоемкость и загрузка (обеспечение ТО заготовками или материалом для работы в течение определенного времени) используются для планирования и выполнения цикла процесса (суммарное время выполнения работ, включая вынужденные или преднамеренные перерывы).</p>	<p>Трудоемкость регистрируется на обратной стороне чертежа. Загрузка устанавливается мастером.</p>
<p>23. Оптимальное размещение оборудования; обеспечение вспомогательными службами, транспортом; ремонт зданий; санитарные условия (отопление, освещение, др.); защита от шума, вибрации; выполнение правил техники безопасности; применение средств индивидуальной защиты.</p>	<p>Хоздоговора с субподрядчиками на выполнение работ Журнал регистрации инструктажей по охране труда, технологии работ и эксплуатации оборудования</p>
<p>24. Сведения, полученные в результате выполнения процесса и представляющие ценность для последующего использования: анализ выявленных несоответствий, результаты аудита, претензии и пожелания заказчиков, др.</p>	<p>Отчет по качеству владельца процесса</p>

Процесс выполняется повторяющимися циклами (циклы непрерывного улучшения PDCA: Plan-Do-Check-Act), которые установлены стандартом ДСТУ ISO 9001. На рис. 2 представлен логистический цикл выполнения заказов единичного производства, структурированный по стадиям цикла PDCA и исполнителям. Это – наглядная схема (карта процесса), позволяющая представить цикличность процесса, последовательность шагов, обратную связь.

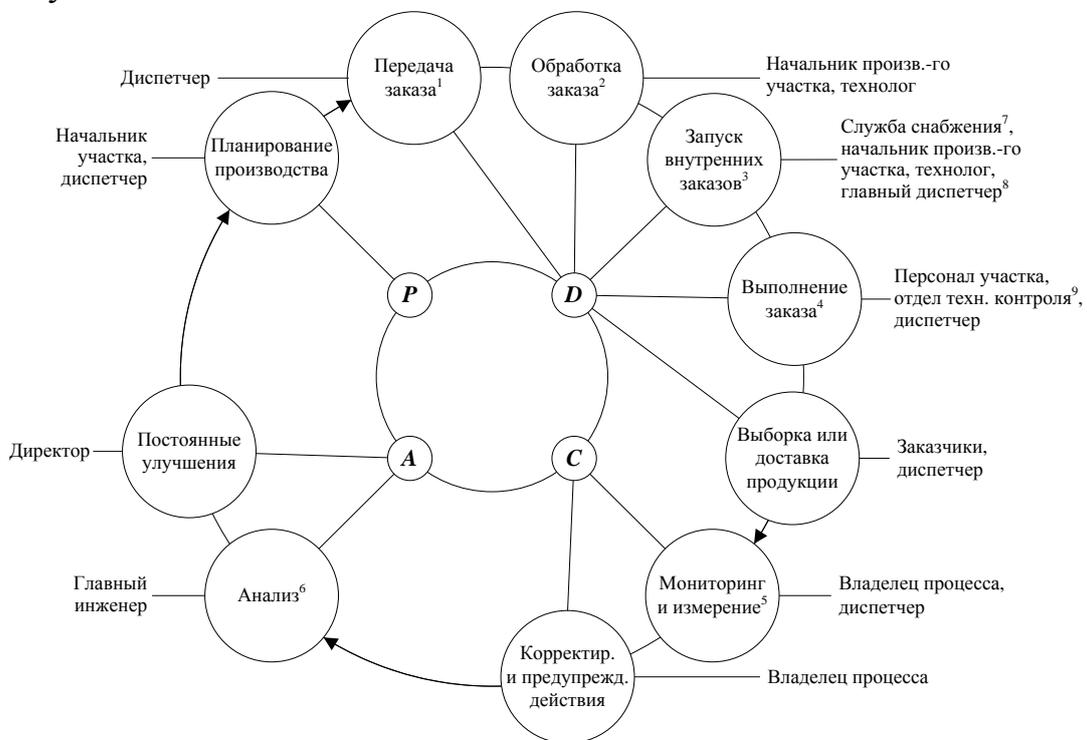


Рисунок 2 – Этапы логистического цикла выполнения заказов единичного производства (карта процесса)

<sup>1</sup> Ряд действий, которые осуществляются с момента, когда заказчик размещает (посылает) заказ, и до момента, когда поставщик его получает.

<sup>2</sup> Процедура приема заказа и трансформации требований заказчика применительно к условиям производителя.

<sup>3</sup> Заказы на закупку материалов, инструмента, на проектирование и изготовление технологической оснастки; заказы изготовителям-смежникам для выполнения нужных работ.

<sup>4</sup> Время выполнения заказа включает время ожидания постановки заказа на выполнение и время выполнения заказа, складывающееся из технологического времени, времени межоперационных простоев и др.

<sup>5</sup> Систематическое слежение за состоянием процесса и параметрами продукции.

<sup>6</sup> Деятельность, предпринимаемая для установления пригодности, адекватности, результативности процесса.

<sup>7</sup> Закупки основных материалов осуществляются автоматически, на основе анализа страницы «Поставки месяца» СУБД «Заказы единичного производства».

<sup>8</sup> Заказы изготовителям-смежникам.

<sup>9</sup> Вызов привлекаемого процесса технического контроля.

*Планирование производства* включает производственный план, который устанавливает ограничения или уровни производственной деятельности на тот или иной момент в будущем. Календарным планом является портфель заказов. Новые поступающие заказы становятся в очередь, или добавляются в портфель заказов. Начальник производственного участка на основе контроля портфеля заказов уравнивает поток заказов с имеющимися производственными ресурсами и производительностью (цель планирования). Он принимает решения по следующим вопросам:

- количество изделий, которые требуется произвести в течение дня, недели, месяца;
- желательный уровень запасов материалов на складе;
- оборудование, трудовые ресурсы и материалы, необходимые в планируемый период времени.

Когда портфель заказов слишком велик, связанные с ним затраты равны затратам на отклонение заказа (передача изготовителю-смежнику). Иногда приходится вводить дополнительные смены и работу в сверхурочное время. Все эти изменения повышают себестоимость. Когда портфель заказов мал, связанные с ним затраты равны затратам на уменьшение уровня производства.

Собственно производственные планы находятся на страницах «План дня», «План недели», «План месяца» СУБД «Заказы единичного производства». Они формируются автоматически – по дате получения заказа (на локальном сервере предприятия). При этом план дня включает заказы, посту-

пившие на участок в течение дня, т.е. которые могут быть еще не переданы в производство. План недели включает заказы, поступившие на участок в течение последней недели (от текущей даты). Соответственно – план месяца. По требованию пользователя СУБД генерирует планы любого указанного интервала времени. Эти данные предназначены для осуществления контроля портфеля заказов со стороны начальника участка, в том числе для прогнозирования потока заказов в будущем, и планирования ресурсов.

Планирование производства включает также потребности в ресурсах – планы поставок (закупок) материалов, которые используются при изготовлении предусмотренных планами производства изделий. Эти планы находятся на страницах «Поставки (закупки) дня», «Поставки (закупки) недели», «Поставки (закупки) месяца» СУБД «Заказы единичного производства». Они формируются автоматически, суммированием данных полей «материал» и «масса изделия» из страницы «Оформить заказ единичного производства». Служба снабжения может использовать планы поставок (закупок) материалов для принятия решений об инициировании закупок конкретной номенклатуры материалов (с учетом увеличения – для производства заготовок).

*Передача заказа* включает процедуры: размещение заказа, включая конструкторскую документацию, на локальном сервере предприятия; предоставление заявки на выполнение работ диспетчеру (финансово-учетный контур).

Если заказчик укажет срок изготовления, меньший одного месяца или пометку «срочно», то это должно означать, что наличие материала было предварительно согласовано, или же заказчик сам предоставляет материал. Допускаются срочные заказы при отсутствии необходимого материала. В этом случае стоимость заказа возрастает на цену издержек срочной закупки.

*Обработка заказа* включает операции: согласование конструкторской документации начальником участка (и, если требуется, технологом) на предмет возможности изготовления и технического контроля, идентификации требований, когда они не четко специфицированы документально; согласование времени выполнения заказа и другие сервисные процедуры, если они востребованы (время и условия доставки готовой продукции заказчику, др.).

*Запуск внутренних заказов* включает процедуры вызова привлекаемых процессов: процесс закупок материалов и инструмента; процесс

управления заказами в логистической сети предприятия (заказы изготовителям-смежникам); процесс технического контроля.

*Выполнение заказа* включает процедуры: производство (продукции) или доработка – осуществляется в соответствии с производственными (должностными) инструкциями; контроль качества выполнения; управление несоответствующей продукцией.

*Выборка или доставка продукции* включает операции получения заказчиком изделий на складе предприятия или доставку изделий заказчику.

*Мониторинг и измерение* включает идентификацию критериев, показателей и нормативных значений показателей. Критерии результативности связаны с приведенными выше целями процесса единичного производства: минимальная длительность выполнения заказов; исключение ошибок в комплектации заказов; бездефектное производство; исключение сверхурочных работ; лояльность (приверженность) заказчиков; полнота учета потребностей заказчиков.

Показатели в соответствии с требованиями ДСТУ ISO 9001 (п. 8.2.1., 8.2.3., 8.2.4.) должны включать информацию, касающуюся удовлетворенности заказчиков, процесса, продукции. В таблице 2 приведены показатели этих трех групп с учетом установленных критериев.

Таблица 2

Показатели	Показатели времени	Технические показатели	Показатели затрат
Удовлетворенность заказчиков	-	-	Объем продаж по одному заказчику
Процесс	Длительность выполнения заказа	Ошибки в комплектации заказа	Затраты на: (1) отклонение заказа; (2) на сверхурочную и многоменную работу; (3) на уменьшение уровня производства
Продукция	-	Процент брака	-

На основании этой таблицы устанавливаем следующие показатели и формулы для их вычисления:  $P_1$  – среднее время выполнения заказа;  $P_2$  – среднее число ошибок в комплектации заказов;  $P_3$  – среднее число дефектов (по заказам);  $P_4$  – среднее число часов сверхурочных работ (по заказам);  $P_5$  – среднее число заказов по каждому заказчику;  $P_6$  – среднее число отклоненных заказов.

$$P_1 = \frac{\text{Календарный период времени}}{\text{Число выполненных заказов}}, \quad P_2 = \frac{\text{Общее число ошибок в комплектации}}{\text{Число выполненных заказов}},$$

$$P_3 = \frac{\text{Общее число дефектов}}{\text{Число выполненных заказов}}, \quad P_4 = \frac{\text{Фонд рабочего времени}}{\text{Нормо-часы выполнения заказов}},$$

$$P_5 = \frac{\text{Число заказов по каждому заказчику}}{\text{Общее число заказчиков}}, \quad P_6 = \frac{\text{Число отклоненных заказов}}{\text{Общее число (портфель) заказов}}.$$

Все показатели рассчитываются за период один месяц. Нормы показателей результативности устанавливаются:  $P_1, P_4, P_5$  – по результатам практики выполнения работ;  $P_2 = P_3 = P_6 = 0$ . Владелец процесса также организует контроль качества продукции, материалов и контроль технологической дисциплины.

*Корректирующие и предупреждающие действия* предпринимаются с целью устранения причин несоответствий, в том числе потенциальных и предупреждения повторного их появления. Они включают следующее.

(1) Рассмотрение сообщений об отклонениях оценочных показателей (в т.ч. сведения о несоответствиях продукции и жалобы заказчиков) для выявления причин несоответствий. При этом управляют только отклонениями оценочных показателей, которые связаны, как предполагается, с источниками особых (или неслучайных) вариаций.

(2) Изучение причин несоответствий, относящихся к продукции, процессу и СМК.

(3) Определение и реализация действий, необходимых для устранения причин несоответствий. Такие действия разрабатываются в следующих случаях: наличие тенденции в проявлении несоответствия; единичный серьезный случай несоответствия, требующий немедленного корректирующего или предупреждающего действия; документированные случаи несоответствия, выявленные в результате аудита качества или проверки руководством.

(4) Регистрация результатов изучения причин несоответствий с указанием суммарного количества и систематизации несоответствий, выявленных за период; корректирующих и предупреждающих действий и их результативности.

Предпринятые действия считаются результативными, если они приводят к минимизации или исключению повторения несоответствий, явившихся причиной предпринятых корректирующих действий или к минимизации

зации (исключению) отклонений показателей, инициировавших предупреждающие действия.

*Анализ* включает операции периодического оценивания пригодности и адекватности процесса (качественная оценка), результативности (количественная оценка), удовлетворенности заказчиков, а также оценку возможности постоянного улучшения. Анализ осуществляет главный инженер на основе полугодовых отчетов по качеству владельца процесса, наблюдений аудитов и заключений по результатам аудитов (внутренних и внешних). Эти отчетные документы должны содержать данные, демонстрирующие (в том числе): удовлетворены ли заказчики; соответствует ли продукция требованиям; каковы характеристики процесса и продукции, тенденции их изменения; уместны ли предупреждающие действия; как работают поставщики.

*Постоянные улучшения* имеют целью увеличение возможности повышения удовлетворенности заказчиков и других заинтересованных сторон. Создание условий для проведения улучшений является ответственностью директора предприятия. Улучшения применяются, если процесс демонстрирует присущую ему стабильность, воспроизводимость (изменчивость), характеристики продукции предсказуемы и отвечают требованиям заказчиков. Процессы с неприемлемой изменчивостью и качеством требуют корректирующих действий. Процессы улучшений могут осуществляться, например, в следующих случаях: внеплановые простои или частые ремонты оборудования; значительная продолжительность запуска технологического оборудования, его переналадки, замены технологической оснастки; чрезмерное время логистического цикла; брак, переделка; излишние операции (транспортировки, погрузки, хранения); изменившиеся требования заказчиков; неудовлетворенность заказчиков (жалобы, возвраты, некомплектные поставки, др.). Процесс как объект улучшения может включать такие изменения как постоянные мелкомасштабные улучшения: технологи; своевременности ремонта или замены оборудования; улучшение приемов работы; повышение технологической дисциплины. А также инновации, или улучшения «большими скачками»: овладение технологиями, ранее не применявшимися; автоматизация техпроцессов.

Процессный подход к управлению предполагает идентификацию связей каждого из процессов с его окружением – построение схемы взаимодействия процессов. Пример такой схемы, включающий процесс единичного производства, приведен на рис. 3.



ства. 14. Документированная процедура планирования системы менеджмента качества. 15. Процесс технического обслуживания, ремонта и модернизации технологического оборудования. 16. Документированная процедура планирования улучшений. 17. Процесс управления документацией и записями по качеству. 18. Процесс анализа деятельности предприятия. 19. Процесс внутреннего аудита.

*Заключение.* В самом общем случае процессом называют ход, протекание какого-либо явления, последовательную смену его состояний. В управлении процессное представление используется для описания развития предприятия. Процессы производственной деятельности – это искусственно создаваемые процессы, они имеют утилитарное предназначение, поэтому понимаются как совокупность последовательных целенаправленных действий [5,6]. Искусственная реализация процесса предполагает построение технологии, где последовательности операций процесса ставится в соответствие последовательность взаимоувязанных средств реализации этих операций. В работе приведено описание процесса единичного производства для построения соответствующей технологии. Оно включает модель процесса, карту процесса и процессный ландшафт – схему взаимодействия исследуемого процесса с другими процессами предприятия. С учетом требований стандарта ДСТУ ISO 9001 приведен пример мониторинга и измерения в рамках процессного подхода к управлению единичным производством.

**Список использованных источников:** 1. ДСТУ 3278:1995 Система розроблення та поставлення продукції на виробництво. Основні терміни та визначення. Введ. 01.01.1997. – К.: Держстандарт України, 1997. – 64 с. 2. Родников А.Н. Логистика. Терминологический словарь / А.Н. Родников. – М.: ИНФРА-М, 2000. – 624 с. 3. Джонсон Д. Современная логистика / Д. Джонсон, Д. Вуд, Д. Вордлоу, П. Мерфи-мл.; пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2002. – 624 с. 4. ДСТУ ISO 19011:2003 Настанови щодо здійснення аудитів систем управління якістю і (або) екологічного управління (ISO 19011:2002, IDT). – К.: Держспоживстандарт України, 2004. – 24 с. 5. ДСТУ 2938-94 Системи оброблення інформації. Основні поняття. Терміни та визначення. Введ. 01.01.1996. – К.: Держспоживстандарт України, 1996. – 35 с. 6. Шередко Ю.Л. Классификация информационных процессов. Когнитивные процессы / Ю.Л. Шередко // Управляющие системы и машины. – 1998. – № 1. – С. 5-17.

**Bibliography (transliterated):** 1. DSTU 3278:1995 Sistema rozroblennja ta postavlennja produkciji na virobnictvo. Osnovni termini ta viznachennja. Vved. 01.01.1997. – K.: Derzhstandart Ukraїni, 1997. – 64 s. 2. Rodnikov A.N. Logistika. Terminologicheskij slovar' / A.N. Rodnikov. – M.: INFRA-M, 2000. – 624 s. 3. Dzhonson D. Sovremennaja logistika / D. Dzhonson, D. Vud, D. Vordlou, P. Merfi-ml.; per. s angl. – M.: Izdatel'skij dom «Vil'jams», 2002. – 624 s. 4. DSTU ISO 19011:2003 Nastanovi wodo zdijsnennja auditiv sistem upravlinnja jakistju i (abo) ekologichnogo upravlinnja (ISO 19011:2002, IDT). – K.: Derzhspozhivstandart Ukraїni, 2004. – 24 s. 5. DSTU 2938-94 Sistemi obroblennja informacii. Osnovni ponjattja. Termini ta viznachennja. Vved. 01.01.1996. – K.: Derzhspozhivstandart Ukraїni, 1996. – 35 s. 6. Sheredeko Ju.L. Klassifikacija informacionnyh processov. Kognitivnye processy / Ju.L. Sheredeko // Upravljajuwie sistemy i mashiny. – 1998. – № 1. – S. 5-17.

*C. CONSTANTINESCU, A. KLUTH, Stuttgart, Germany*

## **FLEXIBLE CONNECTION OF PRODUCT AND MANUFACTURING WORLDS: CONCEPT, APPROACH AND IMPLEMENTATION**

*К. КОНСТАНТИНЕСКУ, А. КЛУТ*

*ГНУЧКИЙ ЗВ'ЯЗОК СФЕР ПРОДУКЦІЇ Й ВИРОБНИЦТВА: КОНЦЕПЦІЯ, ПІДХІД ДО ВИВЧЕННЯ, РЕАЛІЗАЦІЯ*

У статті наводяться короткі відомості про сучасні виклики керуванню / гармонізації у сферах розробки продукції й виробництва. Вона являє основи концепції та рішення в просуванні баз даних між неоднорідними й незалежними ICT-застосуваннями, що підтримують конструювання продукції, планування і адаптацію виробництва. Наше рішення із представленим оглядом архітектури "Керування гнучким відтворенням 2.0" наведено в деталях з обґрунтуванням сценарію для взуттєвої індустрії.

*Ключові слова:* виробниче планування, керування виробничими даними, гнучке відтворення.

В статье приводятся краткие сведения о современных вызовах управлению / гармонизации в сферах разработки продукции и производства. Она представляет основы концепции и решения в продвижении баз данных между неоднородными и независимыми ICT-применениями, поддерживающими конструирование продукции, планирование и адаптацию производства. Наше решение с представленным обзором архитектуры "Управление гибким воспроизводством 2.0" приведено в деталях с обоснованием сценария для обувной индустрии.

*Ключевые слова:* производственное планирование, управление производственными данными, гибкое воспроизводство.

The paper shortly introduces the current challenges of orchestrating / harmonizing the two worlds of product and factory engineering. This represents the basis for conceiving our approach and solution for the forwarding of data changes between the heterogeneous and autonomous ICT applications supporting the product design and factory planning and adaptation. Our solution, the "Change Propagation Manager 2.0" is presented through an architecture overview, implementation details and a validation scenario for the shoe industry.

*Keywords:* Factory Planning, Factory Data Management, Change Propagation

### **1 INTRODUCTION**

Today`s enterprises contain of a set of different business units, connected by various information flows as well as resource flows. Every single unit, autonomous to manage its own resources, has the responsibility for delivering services or goods, which are further processed by other units. These units frequently run their own internal information systems in order to manage the data adjusted for the corresponding business processes [1].

These different business units are more and more autonomous and not all information systems store their data in the same way. Each unit uses its own system in order to support its business processes and activities. Moreover, some data is relevant only to a single unit, while other data is relevant to numerous systems and is stored locally. The higher the number of different business units within a collaboration scenario, the higher is the number of heterogeneous information systems that have to exchange data related to the different business processes. Therefore, data changes in one system have different effects on data stored in other systems [1, 2].

Focusing on the connection of product and manufacturing worlds, manufacturing enterprises are forced to deal with ever shorter product life cycles and increasing numbers of variants [3]. The majority of product changes - whether it is a single change, a new variant or a new product - requires an adjustment or redesign of production. With the increasing pressure towards an adaptable business development, the question rises, how to adapt plant structures in a shortest possible time. The most common basis of approaches for creating company structures in a versatile way is a complete awareness of all relevant production planning data of a factory or a manufacturing enterprise [4].

Taking into account the constant change of production systems and their equipment etc. it is evident, that the management of factory data in a useful way, can only take place over the entire life cycle of a plant. That means it is of particular meaning to save, structure and represent all the data from the early planning stages up to dismantling of the factory. Only if the factory planners get access to all needed data and especially the changes about the current configuration of the factory and the products, the planners can make deliberate decisions regarding adaption and optimization of the production [4].

After stating an overview about challenges and approaches in the field of data management, a concept prototype for data change propagation, developed at Fraunhofer IPA and University of Stuttgart – IFF, is given. Afterwards implementation aspects as well as an example scenario are highlighted and the final section concludes the paper regarding future activities to bring data change management on a higher level.

## 2 DATA CHANGE MANAGEMENT

### 2.1 System Heterogeneity

It is more and more important to increase the collaboration and communication between actors within a value-chain. Computer-based information systems are used to support the value-chain activities by allowing automated communication between single actors [2].

Most enterprises have a diverse environment of heterogeneous and autonomous information systems, which can be viewed as producers of/consumers for changed data. If the same data is relevant for several information systems, data changes coming from one system affect data stored in other consumer systems [5].

It is often infeasible or too expensive to manage a single, integrated enterprise information system that feeds all business units with their required data. Therefore, enterprise change management has to be supported by a generic approach to solve data change management. Such a generic approach has to provide the possibility to manage certain data dependencies and help to transform data stored in a source information system into data stored in the depending information systems [1].

Many enterprises have highly diversified IT infrastructures, and both applications as well as data management systems are evolving constantly [6].

One major requirement is to accommodate heterogeneity and to preserve the autonomy of each component. As a solution federated information systems offer access to diverse databases and systems in an integrated way [7].

## 2.2 Terms and Definitions

In the following section some important terms and definitions in the field of data management will be described and explained according to [1, 6].

In this approach, any software system providing access to data is called an *information system*.

A *data model* describes different data structures as classes and the different relationships. Also the specified attributes of the classes and objects are described. A *data schema* specifies the data structures for an information system. There can be more than one data schemas within an information system, and a single schema can be used in one or more information systems. In this approach a *system* is an application. A system can act as a producer and/or consumer of data. A *dependency* is a directed relationship between a data producer (*source system*) and a data consumer (*destination system*).

*Change propagation* is the process of forwarding a data change from a source system to all dependent systems, which need the data. This propagation process includes transformations as well as filtering of the data changes. A *transformation* is here defined as mapping given input data into output data according to a certain specification. The specification defines how the input data has to be adapted in order to represent valid destination data.

*Filtering* is an operation that accepts or rejects a transformation according to a constraint, which is an expression (a set of conditions) over the contents of the input data of a transformation.

### 2.3 Used Standard for Data Exchange

Currently the four main challenges in data management are identified as: capture, storage, retrieval and exchange of data [8]. For the exchange of data, certain standards are necessary.

Extensible Markup Language (XML) is a simple and flexible text format, derived from the Standard Generalised Markup Language (SGML) which is described in the ISO 8879 Standard [9]. Originally, it has been designed for facing the challenges of large-scale electronic publishing. Furthermore XML is playing a more and more important role in the exchange of a wide variety of data for example on the Web [10].

XML is able to deliver portable data, and thus it is considered as a key web application technology. It defines a basic syntax in order to mark up data with simple and human-readable tags. For transforming data between different applications the XML format can be flexible customised. The XML specification syntax defines for example the delimitation of elements by tags, what a tag looks like, the acceptable names for elements and where attributes are placed. XML does not have a fixed set of tags and elements that are supposed to work for everybody in all areas of interest for all time. Developers and writers can define the elements according to their needs [11]. The main XML elements are the XML document, containing XML code, the XML schema, describing the structure of a document and its tags and the XML stylesheets, containing formatting instructions for an XML file. A created XML file can be presented in various ways by the application of different XML stylesheets. As standard text files, XML can be read by any application and therefore the XML format is independent of hardware and software [8].

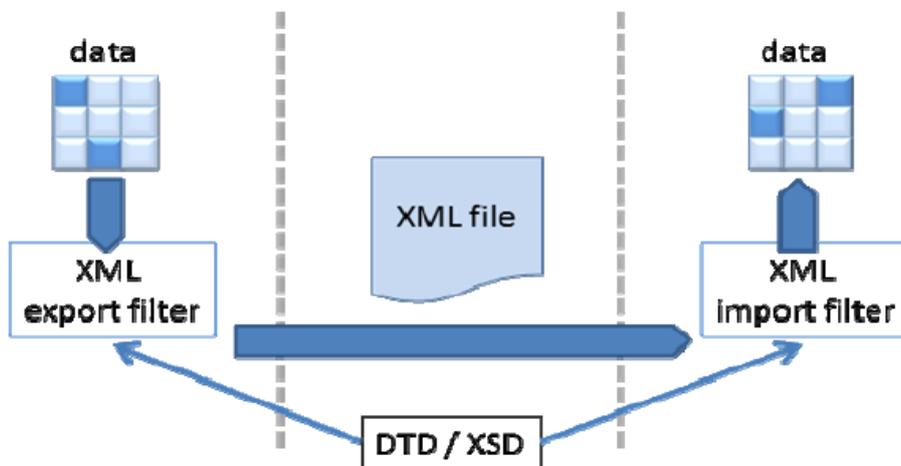


Figure 1 – Data Exchange via XML files, according to [12]

An XML document comprises a reference to a Document Type Definition (DTD), which declares its elements, attributes and grammatical rules. Furthermore it describes which attributes may be applied, their order of appearance, as well as the permissible parent/child relationships [12].

A present schema language, described by the W3C (World Wide Web Consortium) as the successor of DTDs, is the so called XML Schema Definition (XSD). It allows an information exchange in a standardised structure. It defines custom markup tags, which can comprise attributes for describing the content enclosed by these tags. By using an application called *parser*, information could be extracted from the tagged data in the XML document [12].

The exclusive strengths of using XML as a data format contains the simple syntax support for nesting, easy to debug and the independence of language and platform [11].

The use of XML in order to exchange data, provides several benefits, like the usage of human, not computer, language, for what it is therefore human readable and user friendly. It is fully compatible with Java and completely transferrable [13].

### 3 CHANGE PROPAGATION MANAGER 2.0

#### 3.1 System Overview

The Change Propagation Manager 2.0 (CPM 2.0) bases on the philosophy of a Product Lifecycle Management by integrating Product Data Management (PDM) with Factory Data Management (FDM). This flexible integration allows a communication between product and factory data, supporting the synchronization of the product and process data. Moreover CPM 2.0 supports the propagation of product data from the product design applications to the FDM system and vice versa (XML data exchange). This system guarantees that all exchanged data is compliant with the defined Data Model. In this way a decoupling between manufacturing side tools and product design tools will be achieved without losing the integration between the two sides. The tools export their data in a common XML-based file format. The specific XML-formats from the different applications have to be transformed into the common XML, before they are being passed to the CPM 2.0.

This solution achieves the decoupling of the tools, both between each other and from the data management system, implementing the central role of the Data Model as the common speaking language. All the tools, being connected to this centre, become really independent one to each other and communicate only through CPM 2.0. The focus is not on providing a global view for querying data sources but more on providing a solution for flexible integration and a flexible

method for propagating data between autonomous and heterogeneous application systems from product and manufacturing world.

The developed prototype is a part of the European research project “Design of customer driven shoes and multi-site factory” (DOROTHY – EU FP7-NMP) on innovative concepts and technologies to enable highly flexible mass customization systems in the manufacturing shoe industry.

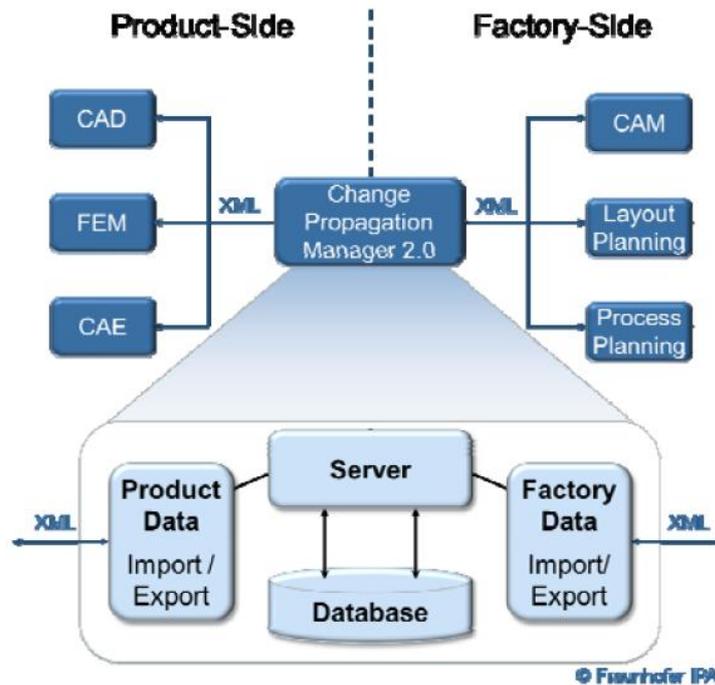


Figure 2 – Change Propagation Manager 2.0 Landscape [4].

### 3.2 Implementation

The Change Propagation Manager 2.0 is a system aiming to fulfil two main functionalities:

- Flexible integration of Factory Data Management and Product Data Management within a PLM Software supporting the synchronization of product and process data.
- Coupling of the product side application to the PLM System as well as of the factory side application to the PLM System, supporting the propagation of product and process data from/to product side application to Data Management System and of the product, process and resources data from/to the factory application to the Data Management System.

The propagation of data and the corresponding changes is implemented by using service-oriented and grid based architecture. This form of architecture allows the system, depending on the planning phase, to create connections be-

tween the different single software applications. Therefore for example at the end of the product-design phase the CAD data can be used for the Product Data Management (PDM) System as well as the Factory Data Management (FDM) for other planning and engineering activities. On the other hand, the adjustments referring to subsequent changes such as of equipment or tool data will be written back to systems of earlier stages of development, such as the aforementioned CAD system. For this purpose the individual applications of both the product and the factory world can connect with the server of the CPM 2.0 via online services and Client-/Server applications in order to upload their respective data in the form of XML files. The digital information are collected, transformed and automatically checked against a central database (Siemens PLM System Teamcenter Manufacturing). This allows the identification of possible changes of the data. These changes will also be described in an XML file and forwarded to the server from the PLM System. Afterwards through a Notification Service the involved software applications will be notified, that there have been done significant data changes needed for their planning activities. The changed data can be downloaded from the server or transmitted directly into the corresponding program via specified client interfaces. This creates a common and consistent database. The core of the CPM 2.0 system is a centralized data model as a template for creating product and process data.

### **3.3 Processing Model and Example Scenario**

The following scenario describes the usage of introduced technologies by illustrating a simple data propagation example (Figure 3). This processing model refers to a manufacturing enterprise from the shoe industry that receives a new order for producing a customized new shoe. At least four systems of the enterprise are involved within this scenario:

- *Shoe Design*: Defining the basic shoe components and design for configuration of new shoes.
- *Shoe Customization*: Generating the customized order for new shoes to be produced.
- *Factory Layout Planning*: Planning and adapting the resources/layout concerning the new product.
- *Process Planning*: Planning and adapting the processes concerning the requirements of the layout and the new order.

The scenario flow highlights the main concepts for data change management: the transformation, filtering and routing of data changes. The given scenario consists of the following steps to represent an overall realistic processing model:

- 1) Upload of the shoe-catalogue from Shoe Design Module to CPM 2.0 via Client-/Server application.
- 2) Distribution of the “catalogue.xml” to other tools like Shoe Customization Module.
- 3) Upload of product-structure from Shoe Customization to CPM 2.0 via Client-/Server application.
- 4) Loading the product-structure from CPM 2.0 directly into Teamcenter Manufacturing (PLM System); CPM 2.0 generates XML (transformation) with the productstructure for the other tools like Process Planning.
- 5) Upload the resource-structure from Factory Layout Planning to CPM 2.0 via Client-/Server application.
- 6) Loading the resource-structure from CPM 2.0 directly into Teamcenter Manufacturing; CPM 2.0 generates XML (transformation) with the resource-structure for other planning tools like Process Planning.
- 7) Process Planning tool imports product-structure and resources-structure directly via integrated interface.
- 8) Process Planning activities (Processes sequence; linkage of products, processes and resources; visualization of the material and process flow).

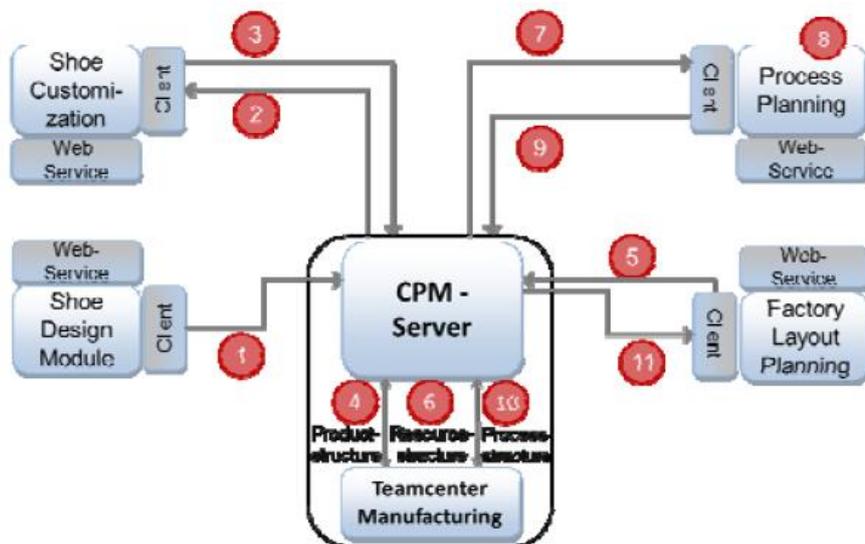


Figure 3 – Data Propagation Scenario

- 9) Export (via integrated interface) and upload of the process data, including linkage between products, processes and resources from Process Planning to CPM 2.0 via Client-/Server application.
- 10) Loading the process data (Linkage between products, processes and resources) from CPM-Server directly into Teamcenter Manufacturing; CPM 2.0 generates XML with the operations-structure and production plan for Layout Planning.

11) Distribution of the transformed data to the involved engineering tools (e.g. Layout Planning) in order to fulfil their planning activities.

Summing up, the Change Propagation Manager 2.0 enhances a flexible integration between product and manufacturing worlds, able to manage synchronized product and process data, collecting and propagating the changes in one single software-based platform.

### **3.4 Advantages and disadvantages**

The main advantage of the presented approach is the flexible connection between heterogeneous planning modules / software applications. By using a corporate Data Model and a common XSD schema the different structures, objects as well as attributes etc. can be described. This leads to a common understanding and communication between the autonomous software tools. The defined Data Model within the presented overall approach follows the specified Data Model of the used PLM System. This ensures that the storing of exchanged data into the PLM System can be realized in a more easy and effective way.

Another advantage of the presented data propagation system is the use of standards for interfacing and data exchange between the different applications, which have to be connected. This offers advantages for the communication regarding openness and simplicity [14].

The presented approach of the Change Propagation Manager 2.0 is not restricted to a certain industry scenario. The approach and the existing system can be adapted and used for several industry sectors, e.g. automotive, machine-building and aerospace industry.

Some of the involved tools within the presented scenario imply real production measured data as input or specific customer data as output. However the presented system does not foresee an ERP development or integration. A solution for that issue could be to foresee an interface to a generic ERP, to understand if the involved tools need a real ERP or eventually to plug an ERP behind these interfaces.

## **4 CONCLUSION AND FUTURE WORK**

Present IT infrastructures require a flexible and loosely coupled methodology for propagating data changes between different enterprise information systems while conserving their data management autonomy [2]. Within this paper, the shown approach suggests a software component, called Change Propagation Manager 2.0 (CPM 2.0), that deals with dependencies between data stored in potentially different schemas and models and with the propagation of needed data to different systems. The Change Propagation Manager 2.0 achieves a transformation of an incoming XML message into an XML output message based on a transformation specification that has been defined for certain data

dependencies [1] and workflows. For the future work, more standards for data exchange have to be defined and developed in order to enable new concepts and architectures for integrating heterogeneous software applications.

Concerning the described example scenario, there should be further work on integrating and using workflow management systems as well as adapting such concepts and approaches from manufacturing sector to other industrial sectors.

Apart from all the technical aspects, the significance of integrating knowledge within such change management approaches will increase more and more in the future. Therefore not only the dealing and the propagation of data, but capturing, transferring, managing and integrating knowledge through change management systems between different applications and users should be more taken into consideration.

## 5 ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to thank Mr Axel Bruns, the Chief Integration Officer of our Grid Engineering for Manufacturing Laboratory (GEMLab) in Stuttgart for supporting us in developing and implementing our ideas and concepts on European level as well as into our GEMLab.

**REFERENCES:** **1.** *Constantinescu, C., Heinkel, U., Rantzau, R., Mitschang, B.*, 2002, A System for Data Change Propagation in Heterogeneous Information Systems. **2.** *Makris, S., V. Xanthakis, D. Mourtzis and G. Chryssolouris*, 2008, On the information modeling for the electronic operation of supply chains: A maritime case study, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, (Vol.24, No.1, 2008), pp. 140-149. **3.** *Alexopoulos, K., Makris, S., Xanthakis, V., Chryssolouris, G.*, 2010, A Web-Services oriented workflow management system for integrated production engineering, *Proceeding of the 43<sup>rd</sup> CIRP International Conference on Manufacturing Systems*, Vienna, Austria (May 2010), pg. 351. **4.** *Westkämper, E., Constantinescu, C., Landherr, M., Kluth, A., Eichelberger, H.*, 2010, *Fabriklebenszyklus-Management; Unterstützung des FLM durch PLM, it-Production: Product Lifecycle Management (PLM) 2010/11.* **5.** *Constantinescu, C., Heinkel, U., Meinecke, H.*, 2002, A Data Change Propagation System for Enterprise Application Integration. **6.** *Rantzau, R., Constantinescu, C., Heinkel, U., Meinecke, H.*, 2002, Champagne: Data Change Propagation for Heterogeneous Information Systems. **7.** *Constantinescu, C., Heinkel, U., Rantzau, R., Mitschang, B.*, 2001, SIES - An Approach for a Federated Information System in Manufacturing. **8.** *Watson, R. T.*, 2009, XML - Managing Data Exchange, available at: [http://en.wikibooks.org/wiki/XML\\_Managing\\_Data\\_E\\_Exchange](http://en.wikibooks.org/wiki/XML_Managing_Data_E_Exchange), 2010-12-15. **9.** International Organization for Standardization – ISO 8879, 1986 Information processing – Standard Generalized Markup Language (SGML). **10.** World Wide Web Consortium (W3C), Extensible Markup Language (XML), available at: <http://www.w3.org/XML/>, 2010-12-15. **11.** *Harold, E. R.; Means, W. S.* 2004, XML in a Nutshell, O'Reilly Media Inc., 2004. **12.** *Bodendorf, F.*, 2005, *Daten- und Wissensmanagement*, Springer [13] IBM: Advantages of XML; In : IBM iSeries Information Center-Version 5 Release 3 (V5R3), available at: <http://publib.boulder.ibm.com/infocenter/iseres/v5r3/index.jsp?topic=%2Frzakl%2Frzaklintroadvantages.htm>, 2010-12-15. **14.** *Chryssolouris, G., Makris, S., Xanthakis, V., Konstantinis, V.*, 2003, An XML based implementation of the Value Added Chain in Manufacturing: A Ship repair Case Study, In : *CIRP Journal of Manufacturing Systems*, (Vol. 32, No.6, 2003).

*M. LANDHERR, C. CONSTANTINESCU, Stuttgart, Germany*

## **CONFIGURATION OF FACTORIES AND TECHNICAL PROCESSES: WHICH ROLE PLAYS KNOWLEDGE MODELLING?**

*М. ЛАНДХЕР, К. КОНСТАНТИНЕСКУ*

*КОНФІГУРАЦІЯ ПІДПРИЄМСТВА Й ПРОМИСЛОВИХ ПРОЦЕСІВ: ЯКУ РОЛЬ ГРАЄ МОДЕЛЮВАННЯ БАНКУ ЗНАНЬ?*

Стаття представляє наші перші дослідницькі кроки, що переслідують ціль розвитку методології для побудови конфігурації, що ґрунтується на банку знань, підприємства й промислових процесів. Звернено увагу на необхідність впровадження вперше розглянутого комплексного завдання конфігурації баз знань як високоефективної технології. Аналіз необхідних умов проілюстрований мотиваційним сценарієм, що походить з аналізу реальної інформації, взаємозв'язків технологій і їхньої пристосованості для перекомпонування виробничих потужностей. Статтю завершує вибір підходящих до застосування технологій і дорожня карта майбутньої активності.

*Ключові слова:* конфігурація, планування виробництв і процесів, модель бази знань.

Статья представляет наши первые исследовательские шаги, преследующие цель развития методологии для построения основывающейся на банке знаний конфигурации предприятия и промышленных процессов. Обращено внимание на необходимость внедрения впервые рассматриваемой комплексной задачи конфигурации баз знаний как высокоэффективной технологии. Анализ необходимых условий проиллюстрирован мотивационным сценарием, вытекающим из анализа реальной информации, взаимосвязей технологий и их приспособляемости для перекомпоновки производственных мощностей. Статью завершает выбор подходящих к применению технологий и дорожная карта будущей активности.

*Ключевые слова:* конфигурация, планирование производств и процессов, модель базы знаний.

The paper presents our first research steps aiming at the development of a methodology for knowledge-based configuration of factories and technical processes. The complex task of configuration is firstly introduced and the need for embedding knowledge as an enabling technology is pointed out. The requirements analysis illustrated by a motivation scenario is followed by the analysis of state-of-the-art information and communication technologies and their particular applicability for the configuration of production facilities. The paper concludes with the selection of suitable enabling technologies and the roadmap of future activities.

*Keywords:* Configuration, Factory and process planning, Knowledge modelling.

### **1 GROWING EFFORT FOR FACTORY AND PROCESS PLANNING**

Manufacturers have to handle shorter product life cycles and growing ranges of variants, to stay sustainable in an enormous national and more and more international competition. That induces an increasing need for adaption of existing factories and development of new processes or production facilities.

Every single new or redesign of a production requires its own planning project. That leads to a constantly growing frequency of factory and process planning projects. In addition to this challenging perspective, the complexity in manufacturing and in the corresponding planning projects increases [1].

These two points, the higher frequency and the increasing complexity of planning projects, lead to exponential increasing effort, which gets more and more difficult to manage for today's manufacturers. The research topic presented in this paper aims at the reduction of the effort explained above. The approach is to support the planning of whole factories and technical processes with configuration.

In this context configuration means to find a solution by combining predefined components, which satisfies customer needs without violating any constraints [2]. Configuration models describe the structure and the technical and economic constraints. Customer requirements can be seen as additional constraints. Thus, the customer requirements represent the input and the solution, configured with help of the configuration model, the output of a configuration process [3]. A configuration engine undertakes the task of computing valid solutions with help of the configuration model. This configuration engine is not focus of the early stage of research introduced here.

According to the industrial paradigm 'Factory as a Product', factories are complex socio-technical products, which contribute to value creation by efficient transformation of resources into high-adding value products [4]. The next step is to adapt technologies of product configuration for the overall goal of decreasing the effort for factory and process planning. The knowledge about methods and models which are used to configure highly complex products supports the development of a comparable model and methodology for factory and process configuration.

This paper introduces our first research steps in developing a configuration approach for planning factories and technical processes.

Some terms used in this paper have to be clarified in advance. The model to represent configuration knowledge is called Factory and Process Configuration Model (FaCoM). This model consists of objects and their relations. The configuration objects can be configuration steps or configuration items. Configuration steps represent the components of the configuration process. This process provides the overall structure for the model introduced here. And for the decisions, made in the respective configuration steps, the term configuration item is used in this paper. These configuration items are composed of attributes and ports. Attributes specify descriptive features (definition, classification, technical and functional characteristics etc.) and ports represent interfaces and relations to other objects [5].

After highlighting the great potential and the requirements for such a model, an overview over the state of the art in the fields of factory and process configuration and the corresponding information and communication technologies is given. Afterwards the approach is introduced and a roadmap concludes the paper regarding future activities to create a foundation for the support of planning processes by flexible, sustainable and time and cost saving configuration of factories and technical processes.

## 2 POTENTIALS IN CONFIGURATION OF FACTORIES AND TECHNICAL PROCESSES

This chapter concretizes the motivation and great potential behind the approach of configuring factories and technical processes. While going through a planning project, a huge amount of explicit and tacit knowledge is generated. A large number of decisions are made and every single decision has its own reasons. Sometimes these reasons are obvious (e.g. use of a turning machine when the product is a usual shaft), sometimes not (e.g. the factory planner chooses the bigger buffer than the calculations recommend, because he ‘knows’, that there can occur unforeseen problems).

Probably an employee, planning factories for years, gets the feeling of always doing the same to some extent in every planning project. He or she always creates knowledge to come to substantiated decisions. Normally it is hard to find two decisions in two different planning projects that are completely the same. But he has this feeling. But why is it not possible for the planner to use a solution from planning phases of former projects? Because he does not know all the influences, constraints and interdependencies, that made the decision (so-called configuration item) to an optimal solution. He does not know whether the already generated solution is really suitable for the new problem. He does not know how the solution affects other configuration objects. The planner is not able to foresee the impact of choosing the solution on the aspired objectives of the actual planning project.

But what if a model ‘knows’ all these interdependencies and influences? Such a model is able to decrease the complexity of a planning project by structuring it [6]. And through embedding knowledge about possible influence of and interdependencies between configuration items and configuration steps, valid solutions can be configured. For the calculation of valid solutions, this model needs to ‘know’ all relations and constraints. Thus, knowledge embedded in a reference model enables a well-founded statement about the impact an already generated solution would have on an actual planning project and the corresponding objectives. The knowledge embedded in the model provides information about what influence a special configuration item has on another (e.g. when choosing this solution, you have to or you can’t choose that).

The configuration model presents the relations between configuration objects and the embedded knowledge enables a characterization and classification of these relations. The corresponding term for this knowledge-rich reference model is Factory and Process Configuration Model (FaCoM) like mentioned before. With this model the factory planner can estimate the impact of a single configuration item on the whole project and is in the position to use a solution of former projects. When knowing this, the employee needs much less experience in factory planning because the planner is able to use solutions of former projects and the configuration model shows the impact. In this paper the input knowledge for using FaCoM is separated into two types: Project-specific (e.g. manually inserted knowledge for actual configuration problem) and historical (e.g. former planning activities) configuration knowledge.

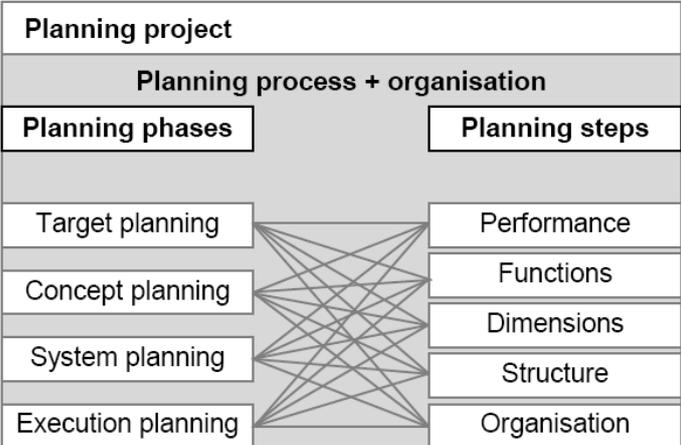


Figure 1 – Hierarchy of planning processes (adapted from [7]).

### 3 STATE OF THE ART ON ITS WAY TO FACTORY AND PROCESS CONFIGURATION

The first part of the following analysis regarding the state of the art in field of factory and process configuration is the factory planning. Especially modern concepts and models for factory and process planning which are probably suitable to provide a structure for FaCoM are analysed. The second part is represented by an analysis of state-of-the-art methods and technologies for product configuration with a special interest to the used information and communication technologies (ICT). First approaches of configuring factories and processes are introduced and examined as the third and last foundation part of this state of the art analysis.

#### 3.1 Model-based factory planning

This section addresses the state-of-the-art model-based factory planning. That is of relevance due to the ambition of using, adapting and extending already existing models for factory planning to make them feasible as a structure for FaCoM.

Figure 1 shows, how the following terms are used in this paper. The planning process is the structure of a planning project. This process arranges planning phases, which consist of single planning steps.

Systematisation and structuring of factory planning projects has a long tradition [8]. Process oriented methodologies [9] are more and more switching to object oriented approaches. This changeover is to provide planning processes with flexibility. Planning projects cannot be standardized to be really supported by one of these rigid phase oriented processes. Model driven factory planning represents the next step for structuring object oriented planning projects [6]. The objects are mostly characterized as planning phases or activities. Some model-based planning processes can be identified, describing the planning phases in different granularity [10]. One of the most important representatives for model based factory planning is the ‘Reference Model for Factory Engineering and Design’ (Figure 2). This model claims to be on its way to a holistic reference for factory and process planning. These models provide detailed and substantiated structures for the planning of processes and factories, which are analysed to be used and/or adapted for FaCoM.

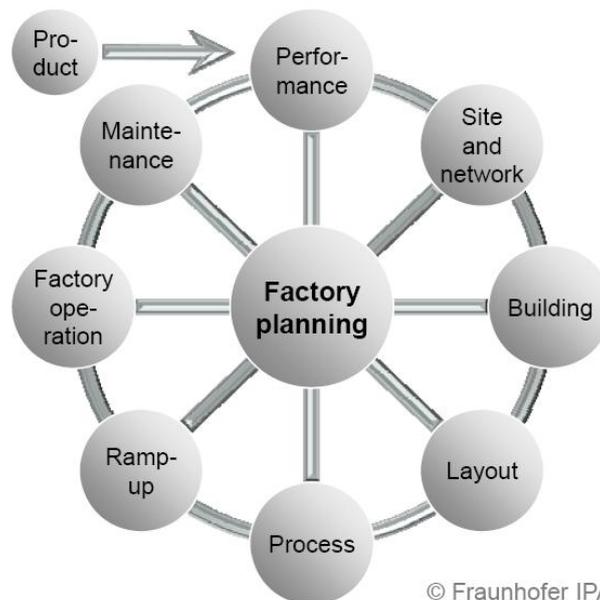


Figure 2 – ‘Reference Model for Factory Engineering and Design’ (adapted from [11]).

### 3.2 Configuration concepts with corresponding ICT

Due to the fact, that the research topic introduced in this paper is in an early stage, this section deals with concepts and models and the corresponding ICT used in the field of configuration. It is not about an analysis of state-of-the-art configurators. Customer interfaces for knowledge acquisition, ICT for problem-solving or something like this is not the focus of this contribution.

To arrange configuration methods, they are classified according to the structuring of configuration knowledge. The main concepts are introduced here [5]:

- Rule-based systems are also known as expert systems using rules for the representation and computing of configuration knowledge. The main problem with this kind of configuration operation is the maintenance. This is caused by the lack of an organization of defined rules [12].

- Model-based systems provide this organization by a system model, which enables a modularization by implementing decomposable objects with their interdependencies. It supports the separation between what is known and how the knowledge is used. The Unified Modeling Language (UML) [13] provides an easy to use notation for modelling complex configuration systems [14]. Model-based configuration can be further classified [15].

- Logic-based reasoning is based on declarative description logic, which is to represent knowledge. It is based on objects, which are interrelated and subsumed to classes.

- Resource-based approaches organize and characterize their objects as resources they supply, use and consume [16]. A very interesting issue with resource-based reasoning is the separation of system, catalogue and heuristic knowledge. This provides a clear separation of what an object is, its characteristics and the knowledge how this can be used. This approach is useful for finding a solution covering desired functionalities. But problems can occur, when it is forced to deal with structural and specific placement requirements.

- Constraint-based systematization offers another representation of the relations by ports of configuration objects, which allow, forbid and/or characterize connections to other objects [17].

- Case-/context-based reasoning addresses a configuration problem solving by former generated solutions. For instance, this reasoning is used in connection with fuzzy logic to identify historical cases which can be used or adapted [18]. This approach suffers from the difficulty of acquiring knowledge in form of enclosed cases and from a lack of support for maintaining knowledge bases for case-based reasoning [19].

- Genetic algorithm-based product configurators focus on one-of-a-kind production. Because of ANDOR trees as the modelling method used here, this reasoning is only suitable for configuration problems, where only a few configuration constraints exist [20].

- Ontology-based representation of configuration knowledge is a very promising approach. Under this topic, semantic web technologies like Web Ontology Language (OWL) [21] and Semantic Web Rule Language (SWRL) [22] are used to model configuration knowledge including the necessary knowledge base and the configuration engine. This approach claims to support a

re-use of configuration knowledge on an unreached level [23]. By connecting data with semantic meta data, the ontology-based approach aims at an automatic readability of knowledge.

### 3.3 Configuration of Factories and Processes

This section is about existing approaches for supporting factory and process planning activities with configured recommendations or solutions.

According to product configurators serving as a basis for initial investigations in the field of factory and process configuration, an approach from Homag Holzbearbeitungssysteme GmbH (HOMAG) is the first example. As a leading provider of equipment for wood machining, HOMAG is very engaged in configuring its products. As the products of HOMAG can reach to whole production lines, the configuration of these can be used as an example for a first step into the direction of the configuration of factories. But this configuration approach is meant to deal only with a small set of standardized components [24].

In the field of configuring technical processes, the TECHBASE in connection with INNOTECH and RATECH has to be mentioned. TECHBASE serves as an information system for technologies. INNOTECH is to identify innovative technologies and RATECH helps finding the suitable technology by providing evaluations of different technologies. These systems are not meant for the configuration of technical processes, but they support process planning activities with recommendations about usable technologies [25].

These similarities with configuration approaches can provide valuable input for the approach introduced here. This summary of the state of the art regarding the development of a model for the configuration of factories and technical processes represents the basis for the approach introduced in the following section.

## 4 THE WAY TO THE FACTORY AND PROCESS CONFIGURATION MODEL - FACOM

### 4.1 Foundations for FaCoM

The pursued approach in the topic of configuring factories and processes is to develop a generic, adaptable and above all knowledge-based model, which serves as a backbone for the development of future configurators. This model will provide all capabilities, which are required to realize a significant reduction of the effort for planning and adapting factories and technical processes by offering automatically configured recommendations.

Due to the fact, that a factory planning project is a very complex topic, it is very challenging to organize such a huge and manifold amount of knowledge to enable a configuration. The high rate at which knowledge changes, requires special attention in maintaining the knowledge base. To face these challenges, the approach introduced here pursues an ontology-based reasoning. Semantic

web technologies enable an organization of highly heterogeneous knowledge. All descriptions, classifications and characterizations of configuration objects are stored in a configuration ontology. This ontology forms the knowledge base. The structure for organizing the knowledge base is provided by a reference model for factory and process configuration. The combination of the ontology-based reasoning with a model-based structure supports the maintenance of knowledge and thus enables the organization of highly heterogeneous and fast changing knowledge. This knowledge-rich configuration model is shown in Figure 3.

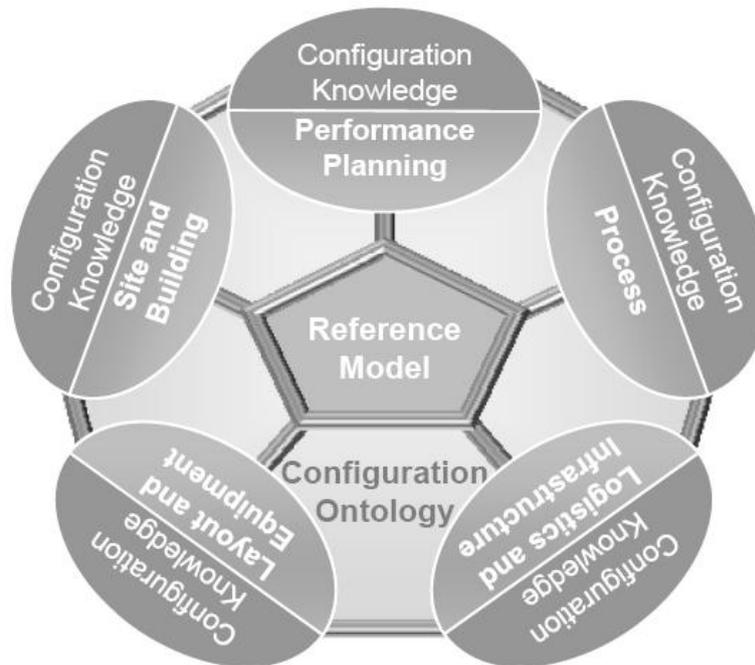


Figure 3 – Factory and Process Configuration Model (FaCoM).

#### 4.2 Roadmap to FaCoM

Due to the configuration of factories and technical processes as a very new and complex research topic, the activities for the next years are of special interest. The next research step will be to concretize the applicability of an ontology-based organization in combination with a model-based structure.

This will be followed by adapting existing reference models for factory planning as a structure for FaCoM. In parallel, an ontology for factory and process configuration knowledge will be developed. Afterwards the knowledge base will be connected with or embedded in the reference model for factory and process configuration. These represent the three foundation pillars for FaCoM:

- Ontology-based knowledge organization.
- Model-based knowledge structuring.
- Connection of both by embedding the knowledge in a reference model.

While pursuing this goal, some challenges have to be faced:

- Classification of configuration knowledge.

- Proper modularization of a generic factory configuration project to define single phases and steps as configuration objects.
- Acquisition of knowledge without an ICT expert and without a significantly increasing effort for the technical expert.

**REFERENCES:** **1.** *Jovane, F., Westkämper, E., Williams, D.*, 2009, The Manufuture Road: Towards Competitive and Sustainable High-Adding-Value Manufacturing. **2.** *Mittal, S., Frayman, F.*, 1989, Towards a generic model of configuration tasks, Proceedings of the 11th IJCAI, S1395-1401. **3.** *Yang, D., Dong, M., Miao, R.*, 2008, Development of a product configuration system with an ontologybased approach, Computer-Aided Design, 40:863-878. **4.** *Constantinescu, C., Westkämper, E.*, 2010, A Reference Model for Factory Engineering and Design, DET2009 Proceedings, 66:1551-1564. **5.** *Sabin, D., Weigel, R.*, 1998, Product configuration Frameworks-A Survey, Intelligent Systems and their Applications, IEEE, 13/4:42-49. **6.** *Schuh, G., Kampker, A., Wesch-Potente, C.*, 2010, Condition based factory planning, Production Engineering: Research and Development. **7.** *Schenk, M., Wirth, S., Müller, E.*, 2010, Factory Planning Manual: Situation-Driven Production Facility Planning. **8.** *Spur, G.*, 1994, Handbuch der Fertigungstechnik: Band 6 Fabrikbetrieb. **9.** *Wiendahl, H.-P., Reichardt, J., Nyhuis, P.*, 2009 Handbuch Fabrikplanung: Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten. **10.** *Helbing, K., Mund, H., Reichel, M.*, 2010, Handbuch Fabrikprojektierung. **11.** *Constantinescu, C., Eichelberger, H., Westkämper, E.*, 2009, Durchgängige und integrierte Fabrik- und Prozessplanung, wt Werkstatttechnik online, 99. **12.** *Barker, V., O'Connor, D.*, 1989, Expert Systems for Configuration at Digital: XCON and Beyond, Communications of the ACM, 32/3:298-315. **13.** *Balzert, H.*, 2010, UML 2 kompakt mit Checklisten. **14.** *Felfernig, A., Friedrich, G., Jannach, D.*, 2000, UML as domain specific language for the construction of knowledge-based configuration systems, IJSEKE, 10/4:449-469. **15.** *Blecker, T., Abdelkafi, N., Kreuter, G., Friedrich, G.*, 2004, Product Configuration Systems: State-of-the- Art, Conceptualization and Extensions, MCSEAI, 25- 36. **16.** *Juengst, W. E., Heinrich, M.*, 1998, Using Resource Balancing to Configure Modular Systems, Intelligent Systems and their Applications, IEEE, 13/4:50-58. **17.** *Mittal, S., Falkenheimer, B.*, 1990, Dynamic constraint satisfaction problems, AAAI Proceedings, 90:25-32. **18.** *Xuanyuan, S., Jiang, Z., Li, Y., Zhaoqian, L.*, 2010, Case reuse based product fuzzy configuration, Advanced Engineering Informatics. **19.** *Watson, I., Marir, F.*, 1994, Case-Based Reasoning: A Review, The Knowledge Engineering Review. **20.** *Hong, G., Hu, L., Xue, D., Tu, Y. L., Xiong, Y. L.*, 2006, Identification of the optimal product configuration and parameters based on individual customer requirements on performance and costs in one-of-a-kind production, IJPR, 46/12:3297-3326. **21.** *McGuinness, D., van Harmelen, F.*, 2004, OWL Web Ontology Language Overview. **22.** *Horrock, I., Patel-Schneider, P. F., Boley, H., Tabet, S., Grosz, B., Dean, M.*, 2004, SWRL: A Semantic Web Rule Language Combining OWL and RuleML. **23.** *Yang, D., Miao, R., Wu, H., Zhou, Y.*, 2009, Product configuration knowledge modeling using ontology web language, Expert Systems with Applications, 36:4399-4411. **24.** *Doll, U.*, 2010, Einsatz von mechatronischen Design-Werkzeugen der Digitalen Fabrik für die Anlagenprojektierung, FtK Stuttgart 2010, 631-648. **25.** *Eversheim, W., Schuh, G.*, 2005, Integrierte Produkt- und Prozessgestaltung.

*C. LÖFFLER, E. WESTKÄMPER, K. UNGER, Stuttgart, Germany*

## **CHANGE DRIVERS AND ADAPTATION OF AUTOMOTIVE MANUFACTURING**

*К. ЛОФФЛЕР, С. ВЕСТКЕМПЕР, К. УНГЕР*

### *ЗМІНА ВИКЛИКІВ І АДАПТАЦІЯ АВТОМОБІЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА*

Зміни спонукають виробників до безперервної адаптації своїх підприємств. Заводським підрозділам, які в стані пристосуватися й організуватися відповідально викликам нестабільного зовнішнього середовища, важливо захищати конкурентоспроможність. Зміни викликів, обумовлені ринковою конкуренцією товарів і виробників, і їхній вплив на технологічні сегменти й продуктивні можливості заводу, становлять особливий інтерес для завдань довгострокового стратегічного планування. У цій статті представлений метод планування й оптимізації для систематичного структурного планування. Він передбачає синхронізацію удосконалень продукції й самого виробництва для одержання оптимальної економічної ефективності.

Ключові слова: виробництво, пристосовність, структура підприємства.

Изменения побуждают производителей к непрерывной адаптации своих предприятий. Заводским подразделениям, которые в состоянии приспособиться и организоваться соответственно вызовам нестабильной внешней среды, важно защищать конкурентоспособность. Изменения вызовов, обусловленные рыночной конкуренцией товаров и производителей, и их влияние на технологические сегменты и производительные возможности завода, представляют особый интерес для задач долгосрочного стратегического планирования. В этой статье представлен метод планирования и оптимизации для систематического структурного планирования. Он предусматривает синхронизацию усовершенствований продукции и самого производства для получения оптимальной экономической эффективности.

Ключевые слова: производство, приспособляемость, структура предприятия.

Change forces manufacturers to a permanent adaptation of their factories. Therefore, factory structures, which are able to be adapted and configured according to the challenges of the turbulent environment, are essential to preserve the competitive ability. Change drivers, coming from the markets, products and production, and their effects on the technological segments and capacities of a factory are of specific interest regarding long-term strategic planning tasks. In this paper, a planning and optimization method for systematic structure planning is presented. It is intended to synchronize the developments in product and production for operating at the optimum of economic efficiency.

Keywords: Manufacturing, Flexibility, Factory Structure.

### **1 INTRODUCTION**

Systemic changes characterize the industrial environment, manufacturers have to deal with. In automotive manufacturing the complexity increased enormously in the last couple of years. This can be traced back to a widened product program, distributed manufacturing capacities in a production network and per-

manent changes regarding the technical and technological systems of the factories. For the upcoming years fundamental changes in the product and production systems are to be expected. Manufacturers are forced to adapt permanently to these changes in order to keep their economic efficiency. Changeability and flexibility aspects regarding factory structures will be key enablers for meeting the challenges coming from the global market [1] and for keeping the global competitiveness. Based on a definition of terms, a systematic planning method is suggested in this paper. It has the objective to increase the changeability potential within the capacities and resources of the factories on a long-term strategic basis.

## 2 FUNDAMENTALS OF FACTORY STRUCTURE PLANNING

### 2.1 Definition of terms

Factories are regarded as socio-technical systems consisting of elements, which operate through complex relationships and interactions. The elements of the system factory are characterized by attributes and interlinked by manifold relations and processes in material and information chain [2]. The network and dependencies of system elements and its relationships represent the structure of the system factory [3].

In context of factory structure planning under changeability aspects, the relevant elements to be described are the products and the production. The hierarchy of the products follows the system-technical levels starting from the product portfolio, the vehicle series, models/systems, components, sub-components, parts and material. The production is vertically structured from resource view by the manufacturing network, sites, segments, systems, cells, stations and processes [2, 3]. The product and production view on a factory are regarded in the method on network level down to the fourth level. In this paper, a ‘factory structure’ is defined by the products, resources, capacities, technologies, processes, in-/outsourced value added and the relations in an automotive manufacturing network. The term ‘structure’ is interchangeably used to the definition of ‘factory structure’.

### 2.2 Concept of the planning method

The planning and optimization method for systematic structure planning proposed in this paper follows the steps illustrated in Figure 1.

The first step of the method is a characterization of the existing factory structure based on a detailed analysis of the products and production. Relevant change drivers are identified and classified according to system-technical criteria. They are considered and synchronized in their time line of implementation by introducing a technology roadmap. The effects on the factories coming from the impact of change are specified in the next step. Finally, the results and relations of the first four steps are integrated in a factory variation tool. By the tool,

a variation of the factory structure is simulated and essential adaptations are forecasted. Hence, change processes are systemized in a strategic way.

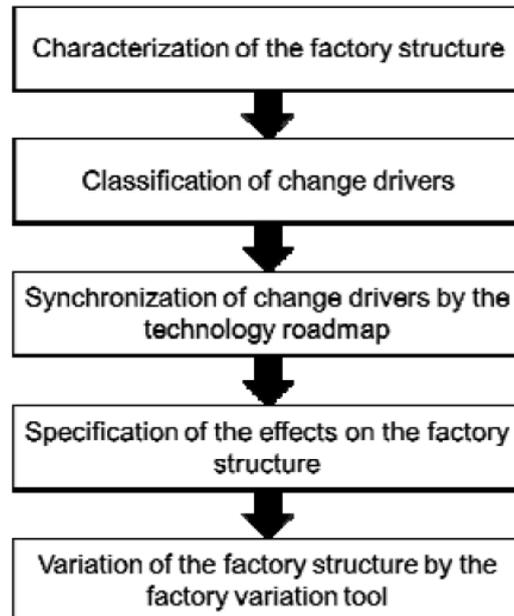


Figure 1 – Method for factory structure planning

### 3 CHARACTERIZATION OF THE FACTORY STRUCTURE

The basis of an optimization is describing the existing factory structure with its relations by an analysis in order to understand and clarify the causalities of the existing systems [4]. A detailed analysis of an automotive manufacturing network comprising the complete product portfolio is accomplished according to the method of structure analysis [5]. The products are analyzed by efforts in hours per vehicle on the levels of the product portfolio, vehicle series, models/systems, components and subcomponents. The efforts, required by the products, are measured along the complete process chain comprising the product design, engineering, planning and manufacturing. The production is described on the level of the network, the manufacturing sites and the segments of parts, components manufacturing and assembly. In addition to the direct manufacturing functionalities, the analysis is extended to the indirect segments of logistics, maintenance, quality and testing. All data were collected in hours per vehicle. Value added, which is produced at the suppliers sites, is attributed as a node to a virtual manufacturing site [5].

Matching the two views, namely the analysis models of product and production, the factory structure is characterized according to Figure 2 in its current configuration. It contains the description of the factory elements in hours per vehicle. The competences regarding the products, the engineering and the technological segments are attributed to manufacturing sites. Hence, the model of

factory structure represents all functionalities of the manufacturing sites, its localization on the layout and the correlating manufacturing requirements coming from the attributed products. The arrangement of this network is a strategic planning task [1]. Any adaptation and optimization is based on this characterization in the planning method.

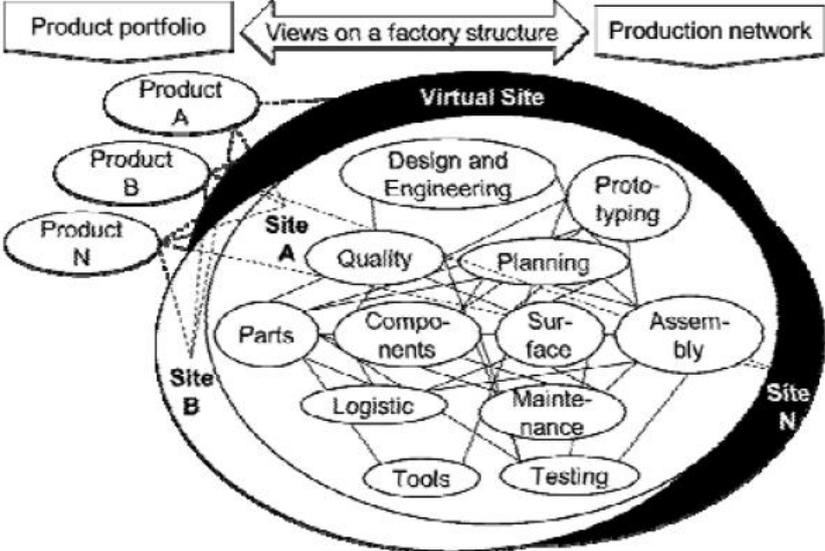


Figure 2 – Characterization of the factory structure

4 SYSTEM-ORIENTED CLASSIFICATION OF CHANGE DRIVERS

The environment of manufacturing can be described as turbulent and dynamic. Since the effects of this dynamism on factories are tremendous, the sources of change affecting the structure of a factory must be identified and classified in a systematic way. This helps to receive transparency regarding cause and effect within the complicated manufacturing processes in a networked production.

Related to the system border of a factory, change drivers are categorized into external and internal drivers. External drivers cannot be influenced by the manufacturer, whereas internal drivers are designed by the manufacturer itself driven by the influences of the environment. The main drivers of change impacting a manufacturing network are illustrated in Figure 3. They are classified into market, product and production driven impacts. Each main driver of change has sub-drivers, which are attributed to the levels of the products and production. The systemic level of the impacting drivers gives hints about the degree and profoundness of change. It is an indication for the necessity of a factory structure adaptation.

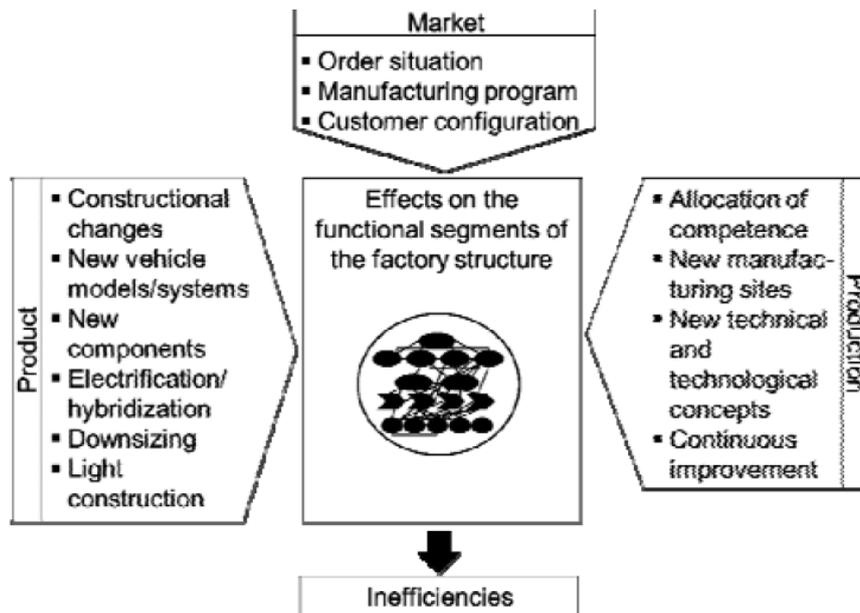


Figure 3 – Classification of change drivers

#### 4.1 Market driven changes

Market driven changes come from the environment outside the system factory and can hardly be forecasted. The unpredictability of the market is one of the main challenges facing manufacturing enterprises at present [6]. Except by marketing strategies of the enterprises the influence on these factors is limited. Therefore, it has highest priority in factory structure planning to adapt permanently to the changes coming from outside the system. Volume related parameters have strong effects on the capacities, e.g. the requirements in hours per year regarding personal and technological resources of the manufacturing network.

The volatility [1] of the market is reflected in the order situation coming from the customer. It impacts the first level of a factory - the whole network of product and production. On the system level of specific vehicle models/systems, the manufacturing program represents the requirements due to the outer vehicle variety with respect to volume and product mix. On components level of the products, the customer configuration leads to an inner variety of the vehicles due to the choice of additional features and the motor gear combinations, for instance. This inner variety has tremendous effects on the capacity requirements of the assembly.

#### 4.2 Product driven changes

Products are permanently under change [1]. The annual frequency of constructional changes is enormous - in the design and engineering phase before launching and during the series production in automotive manufacturing. New vehicle models and systems have the highest degree of change required along the complete product engineering and manufacturing process. Due to the permanent enlargement of the product program, ramp-ups will be the daily situation

manufacturers are faced. On components level the developments of hybrid and electrified systems will lead to changes within the product and therefore within the production. The trend of downsized motor and gear combinations will lead to a shift of the volumes to be produced. On materials level light construction using new materials and material combinations has effects on the products and on the required manufacturing technologies in the production.

#### 4.3 Production driven changes

On the network level of the manufacturer, the decision about the allocation of products and technological competences to the several manufacturing sites is of fundamental strategic importance. Therefore, it is an essential driver on the factory structure in a changeability context. New manufacturing sites offer further capacities, which must be integrated in the existing network. New technical and technological concepts are aligned with capital intensive investments. They modify the capacities and technologies of the production segments in a manufacturing site. A continuous improvement of the production resources, processes and workflows increase the efficiency and change the required capacities in manufacturing. The benefit of these improvements can be seen by analyzing learning and experience curves of the technological segments. Therefore, the effects of the permanent improvements are modelled by learning curves and are considered in the method for strategic factory structure planning.

#### 4.4 Necessity of adaptation

In consequence of the described changes, there are inefficiencies in the factory structure to be observed. The efficiency of the system depends on the efficiency of each system element of the factory and its relations. If the overall efficiency is in danger, an adaptation of the factory is affordable in the strategic context of this paper. Therefore, the measurement and criterion of factory structure optimization must follow the criterion of economic efficiency.

### 5 SYNCHRONIZATION OF CHANGE DRIVERS BY THE TECHNOLOGY ROADMAP

Based on the classification and description of expected changes in the future manufacturing environment, it is important to consider the time schedule, when changes are to be expected in the factories. Therefore, a technology roadmap is developed to synchronize the product program, new product technologies and new production technologies [7]. By the technology roadmap, capacities, technologies, resources and investments are planned in a systematic way. Based on this approach, a technology roadmap is suggested and built up according to Figure 4. Correlating to the classification of change drivers, the technology roadmap contains the three main sections of market, product and production in-

duced changes. The sub-structure of these three main drivers corresponds to the vertical system levels of change described in chapter 4. In context of strategic structure planning the proposed level of detail regarding the products and production seems to be adequate. Optimizations on a more detailed level of the factory structure are not treated in this paper.

The planning horizon of a long-term strategic planning with the focus on factory structure optimization and adaptation comprises ten years in this methodology. This time span is practically manageable in the automotive industry regarding common planning processes and the correlated uncertainty. Therefore, the time horizon, regarded and implemented in the suggested technology roadmap, comprises the next ten years of expected market, product and production developments in automotive manufacturing.

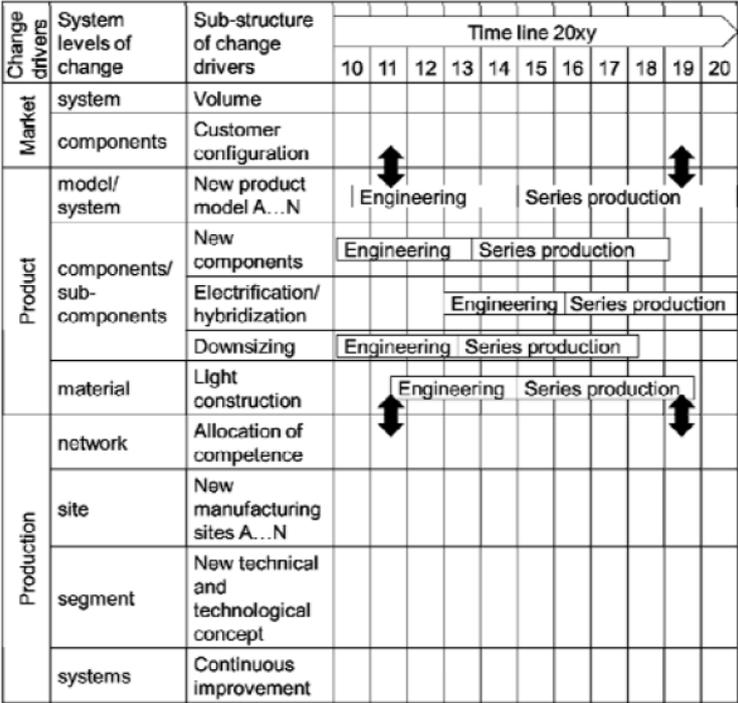


Figure 4 – Synchronization of change drivers by the technology roadmap.

Systemic changes with effects on the functional segments of the factory structure, which are planned for the defined time span of ten years, are specified in the technology roadmap. Two points in time are marked in the technology roadmap: first, the implementation readiness and start of series production; second, the time span required for design, engineering and planning. These pre-located functions along the system development process, which prepare and support the maturity for ramp-ups, are denoted as engineering phase in the technology roadmap according to the convenient schedules.

The order behavior of the customer is reflected in the order situation of the manufacturer. A variation of the manufacturing program affects the volumes per years to be produced by the manufacturer. The forecasted volume history per year based on a long-term sales and operation planning on the level of specific vehicle models is integrated in the technology roadmap by quantity. In this history, the life cycles of vehicle systems are noticed. On components' level the customer configurations of ordered models regarding trim-lines, engine and additional features are considered in the technology roadmap. The distribution of maximum, basic and minimum configurations is derived by the history of built vehicles in the past and an adequate market analysis. Both sub-drivers, the volume and the configuration, are quantitative factors and have a direct effect on the personal and technical capacities of the manufacturing and suppliers' network.

Conceptual changes are outlined in the sections of product and production driven changes in accordance to the levels of product and production.

Constructional changes of the products are noticed on all system levels of a vehicle: new models must be integrated in the product program and components are permanently changed and implemented in the systems. New materials on parts and components level change the vehicle systems and require adequate technologies.

All of these developments are in strong correlation with the developments of the production. The competence allocation of product and technological segments are of strategic importance. Changes in the arrangement on network level of product and production are outlined in the technology roadmap. On the second system level, new manufacturing sites offering additional competences and capacities must be regarded in a networked production. New technical concepts and technologies offer new capabilities to fulfil the manufacturing requirements coming from the constructional changes of the products. They are associated with investments in the production segments. Continuous improvements of the production systems increase the performance and quality of manufacturing. It is modelled by learning curves and is taken into consideration for the strategic planning method. The interdependencies between market driven changes, developments in the products and consequences for the production become obvious.

The technology roadmap as described and suggested in Figure 4 is a strategic planning tool, where the development lines of the three main change drivers market, product and production are illustrated according to their systemic levels. The correlations and dependencies are visualized and concentrations of changes are noticed with respect to the year of implementation. Based on this tool measures are derived for meeting the implementation schedules in advance and synergetic effects are obtained by a holistic perspective. A consequent migration and transfer regarding the dependencies outlined between the driver lines of market, product and production helps to synchronize the developments in product and production. In consequence, a dynamic and permanent adaptation of

the technologies, capacities and resources is possible due to a systematization of the change processes.

### 6 EFFECTS ON THE FACTORY STRUCTURE

The technology roadmap contains all developments described in their characteristics with respect to the time schedule of implementation. The next step of the method is now to link these changes with the factory structure characterized by detailed analysis according to chapter 3. The capacitive and technological effects of the change drivers on the functional segments of the factory structure shown in Figure 2 are of specific relevance in context of a structure optimization.

Therefore, an effect matrix is suggested in order to support this step of the methodology in factory structure planning shown in Figure 5.

Change drivers	Vertical system levels of change	Sub-structure of change drivers	System levels along process chain												
			Engineering			Series production				Indirect function					
			Design/Engineering	Tool Making	Prototyping	Planning	Purchase	Parts	Components	Surface treating	Assembly	Testing	Quality	Logistics	Maintenance
Market	system	Volume					●	○	●	●	●	●	○	●	○
	components	Customer configuration					○		○		●	○	●	●	
Product	model/system	New product model A...N	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	components/sub-components	New components	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	○
		Electrification/hybridization	●	●	●	●	●	●			●	●	●	●	
		Downsizing	●		●	●	●				○				
material	Light construction	●	●	●	●	●	●	●	○			●			
Production	network	Allocation of competence	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	site	New manufacturing sites A...N	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	segment	New technical and technological concept								●	●	●	●	●	●
	systems	Continuous improvement								●	●	●	●		

● strong effect  
○ weak effect

Figure 5 – Effects on the functional segments of the factory structure

The input drivers of change are described in their vertical levels on one dimension of the matrix. In the second dimension the functional segments of the factories along the process chain of system engineering and manufacturing are outlined. For each driver line of change the effects on the specific functional elements in the factory structure are described in a qualitative way. In addition, assumptions for the next step of the planning method are defined. The effects of the change drivers on the capacities of the factory are shown. This comprises the engineering phase, the direct functions of the series production and the indirect functionalities supporting the value adding manufacturing segments. The effects of the main drivers of change are described qualitatively in the matrix shown in Figure 5 by a classification in strong effect, weak effect and no effect on the capacities.

Market driven changes mainly influence the series production. The variation of the volume affects all functions starting from the parts manufacturing, components assembly, surface treating to the final assembly of the vehicle model. The variation of the customer configuration primarily affects the assembly. Hence, there are only capacitive effects on the final process before customer delivery. This is affirmed and verified based on an analysis conducted in an automotive manufacturing network.

Constructional changes of the products usually affect the complete process chain on network level of product and production with specific characteristics in the several functional segments. For a detailed estimation of the effects, the change drivers must be clarified in a more detailed way. For this specification, further fundamental studies regarding the dependencies in capacity and technology are essential to give a verified statement.

Changes in the production occur on all system levels. A main purpose regarding strategic structure planning is the allocation of competences to specific manufacturing sites in the networked production. The competence allocation compass the attribution of products to one or more manufacturing sites and the attribution of technological segments to specific manufacturing sites. The configuration coming from this attribution defines the role of a manufacturing site within the network. It decides about the way of processes and about the local occurrence of effects regarding changes driven by the markets, products and production. Due to this importance, the arrangement of the network has to be specifically in focus of strategic structure optimization. Additionally, enormous effects are expected regarding the integration of new manufacturing sites in the production network. The effects concern the complete process chain. Investments in technical concepts and technologies only affect specific technological segments and must be investigated in a more detailed analysis to estimate and

evaluate the effects on the factory structure. Effects coming from a continuous improvement and rationalization are observed and evaluated in all direct segments of the series production. By the effect matrix, the change drivers are linked with the characteristic of the factory structure. Hence, the dynamism of the turbulent manufacturing environment is described in quality.

### 7 VARIATION OF THE FACTORY STRUCTURE

To transfer the qualitative valuation and the assumptions made in the effect matrix to a quantified valuation, a variation tool is developed and implemented in the method for structure planning. The variation tool basically comprises a tableau for input data with the relevant change drivers, a database model of the factory structure and an output field containing the capacity distribution from the perspective of the products and the perspective of production. The link between input and output data is carried out by a calculation algorithm, where the assumptions made in the effect matrix are described. The output capacities are visualized on a user interface of the software environment. The main principle of the factory variation tool is shown in Figure 6.

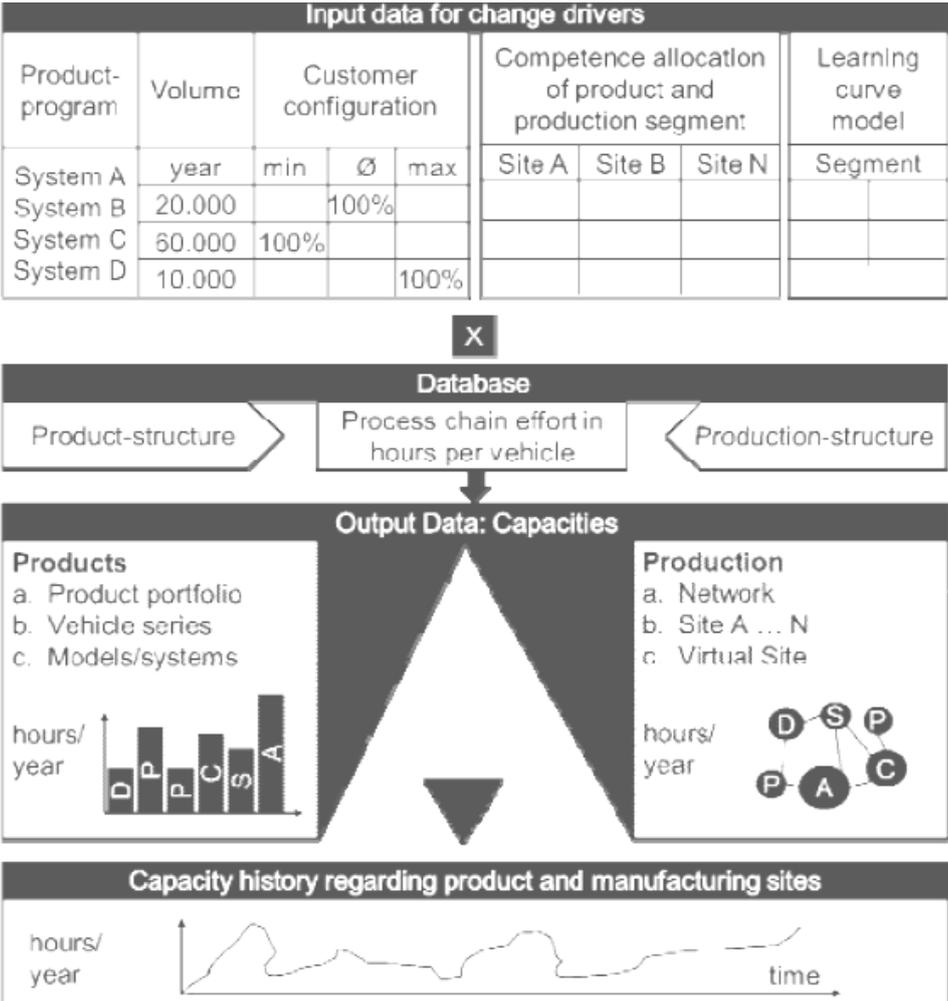


Figure 6 – Factory variation tool

## 7.1 Database

The database of the variation tool is represented by the data model characterizing the factory structure described in chapter 3. The data hierarchy of the tool is derived by the levels of the factory model, which comprises the two sub-models of the products and production. The factory structure model in hours per vehicle builds the basis for any variation coming from the change drivers. The database of the products contains average quantities of reference vehicle models in their system levels analyzed over a representative time range. The capacity hours per vehicle coming from the different vehicle models represent the outer variety to be produced in the manufacturing network. In addition to the fluctuations on systems' level due to the models, the product model comprises quantities of vehicles with maximum and minimum equipment based on the customers' configuration. This represents the so called inner variety of the vehicle model/system in the database. On the one hand, the database from the product perspective gives values and information about the direct manufacturing functions, namely the operation time in series production. On the other hand, it contains efforts which are required in the pre-located functional segments before series production, namely the design and engineering, planning, prototyping and tool making. These efforts depend on the overall volume to be manufactured during the life cycle of the vehicle models/systems. They are transferred to hours per vehicle by the division of the overall life cycle volume.

The production model completes the database due to data from production view. It contains the additional required time of the indirect manufacturing functions, namely logistics, quality, testing, maintenance and support. In addition, the allocation of capacities to the manufacturing sites is considered from this point of view and integrated in the database.

The integration of the two databases of product and production to one basic data, containing the overall process chain effort in hours per vehicle, results from a calculation mode implemented in the functionalities of the tool. This builds the basis for any variation conducted in the algorithm.

## 7.2 Input data for variation

In the input data tableau market, product and production driven changes are integrated. They are relevant to be investigated and evaluated in structure planning with respect to the performance and economic efficiency of the manufacturing network in a quantitative way. They are varied in possible scenarios. The implemented drivers are studied separately or in their combinations of defined scenarios considering the effects on the capacities of the networked production. The

assumptions made in the effect matrix are assigned to the several driver lines and integrated by terms and conditions in the calculation mode. Fixed and variable parameters are defined when combining input data and database.

One of the main change drivers comes from the order situation of the markets and lead to a variability of the manufacturing program in quantity. Changing the volume on the level of vehicle systems, effects on the capacities at the different manufacturing sites are simulated and analyzed for a various number of scenarios. The direct and the indirect functional segments in the series production including the purchase, which is modelled by a virtual manufacturing site of the suppliers, extremely depend on the volume. Therefore, these functional segments are set variable following this driver line. In contrast, the pre-located segments engineering, prototyping, tool making and planning are set as fixed quantity in the calculation mode due to the volume independency.

In addition to the fluctuations of the required capacity hours per vehicle coming from the various models, the inner variability of a vehicle due to the ordered customer configuration is a further important driver of the market. Its effect on the required capacities is integrated in the input data as well. Based on the overall volume the percentage rate of the three trim-lines minimum, average and maximum is varied and the effects are calculated. In the database the quantities coming from the design and engineering efforts as well as the required planning hours remain constant when only varying the vehicle configuration in the data input. In the effect matrix, it is also assumed that the fluctuations regarding the required operating hours only occur in the assembly of the vehicle.

Therefore, any other functional segments are set as fixed parameters for this driver line. Regarding the conceptual changes coming from the products, new systems can be integrated in the product program by adding hours per vehicle along the whole process chain to the database of the factory structure model. Any constructional change and innovation of the products must be evaluated in a further study. Their effects can be integrated by a manual modification of the current database.

The allocation of competence to the manufacturing sites in the regarded network is another driver sourced in the production. On a percentage basis of the manufacturing program products, manufacturing tasks on segment level and the pre-located functions are assigned to specific manufacturing sites. Effects are shown by the distribution of required capacities in the manufacturing sites.

In addition, the manufacturing network can be extended by adding new manufacturing sites to the model. In order to regard measures conducted in con-

text of continuous improvements and rationalizations, industrial learning effects on segments level are integrated in the driver lines of production by a mathematical description. In accordance to the assumptions made in the effect matrix, the learning rates are only applied to the direct manufacturing functions in series production, since effects on other functional segments were not analyzed and verified. Industrial learning effects are regarded in the simulation, optionally.

The input data of the tool comprises the main change drivers, whose effects are calculated by quantity. Basically, it is assumed that the technologies in products and production remain constant during the calculation mode. The architecture of the tool is designed in an open way with the opportunity to integrate conceptual change drivers with respect to products and production manually in the process chain effort of the variation tool. Therefore, further studies will be necessary.

### 7.3 Output data

The data output are the capacities of the manufacturing network in hours per year obtained by a calculation mode integrated in the tool. The effects of market, product and production driven changes on the capacities of the factory are simulated, analyzed and visualized.

The visualization is carried out for the product perspective on the levels of the product portfolio, vehicle series and specific vehicle systems. From the perspective of the production, the results are reported on the network, manufacturing site and segment level. According to the time span of ten years regarded for structure planning in this method, the year based capacity history is prepared for a summarized reporting. On basis of the chosen parameters and scenarios, the results are reported for the product and production view on the manufacturing network. Comparing the results of the scenarios with the restrictions of the current factory configuration, it is derived, when and where an adaptation of the networked production is essential.

## 8 SUMMARY

In this paper, a method for systematic structure planning and optimization was presented. The method was developed to systemize change processes in automotive manufacturing. Based on a detailed characterization of the existing factory structure on network level, change drivers were identified and classified according to systemtechnical criteria. Furthermore, the necessity for an adaptation of factory structures according to the criterion of economic efficiency was outlined. In order to consider the time schedule of expected market, product and

production driven changes in the automotive industry, a technology roadmap was established for the time span of ten years.

The link between the change drivers and the characterization model of the factory structure was made by the development of an effect matrix, where the impacts of changes on the functional segments of the factory were described in quality. Based on these steps, a variation tool for giving the factory structure dynamism by change drivers was designed and implemented in an adequate software environment. In the tool, market, product and production driven changes were integrated for describing and evaluating the effects of driving forces on the capacities of the factory. The factory variation tool builds the framework for the quantitative variations of the factory model due to change drivers in systematic structure planning.

## 9 FUTURE WORK

In the next steps scenarios of possible future changes will be built on basis of the conditions in automotive manufacturing. They will be implemented and calculated in the factory variation tool for describing the effects on the capacities, technologies and resources. Future work will be done by expanding the considerations of change drivers. The effects coming from the variation of technical and technological concepts in products and production, the description of the dependencies and the impacts on the factory structure will be in focus of further research in structure planning and optimization.

**REFERENCES:** **1.** *Wiendahl, H.-P., ElMaraghy, H.A., Nyhuis, P., Zäh, M.F., Wiendahl, H.-H., Duffie, N., Brieke, M., 2007, Changeable Manufacturing – Classification, Design and Operation, CIRP Annals 56/2:783-809.* **2.** *Jovane, F., Westkämper, E., Williams, D., 2009, The ManuFuture Road – Towards Sustainable High-Adding-Value Manufacturing, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg.* **3.** *Jovane, F., Westkämper, E., Williams, D., 2009, The ManuFuture Road – Towards Competitive and Sustainable High-Adding-Value Manufacturing, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg.* **4.** *Ueda, K., 2005, Emergent synthesis based approaches to complexity and uncertainty, CIRP Journal of Manufacturing systems, 34/2: 95-102.* **5.** *Löffler, C., Lakeit, A., Westkämper, E., 2010, Methodology for Structure-Analysis of Automotive Manufacturing, Sustainable Production and Logistics in Global Networks, 43<sup>rd</sup> International CIRP Conference on Manufacturing Systems, Vienna, May 25-28: 925-932.* **6.** *ElMaraghy, H.A., 2009, Changing and Evolving Products and Systems – Models and Enablers in ElMaraghy, H.A., Changeable and Reconfigurable Manufacturing Systems, Springer Verlag, London, UK.* **7.** *Burgstahler, B., 1997, Synchronisation von Produkt und Produktionsentwicklung mit Hilfe eines Technologiekalenders, Dissertation Technische Universität Braunschweig, Vulkan Verlag, Essen.*

*J. MINGUEZ, S. SILCHER, B. MITSCHANG,  
E. WESTKAMPER, Stuttgart, Germany*

**TOWARDS INTELLIGENT MANUFACTURING:  
EQUIPPING SOA-BASED ARCHITECTURES  
WITH ADVANCED SLM SERVICES**

*ДЖ. МІНГЕЗ, С. СІЛЧЕР, Б. МІТШАНГ, Э. ВЕСТКЕМПЕР  
НАЗУСТРІЧ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОМУ ВИРОБНИЦТВУ SOA-БАЗОВАНЕ  
УСТАТКУВАННЯ ІЗ ТИМЧАСОВИМИ СИСТЕМАМИ SLM*

Передбачення заснованих на знаннях і штучному інтелекті виробничих систем викликає розвиток системних структур, які можуть гнучко управляти інформаційними потоками в паралелях спільно працюючих виробничих систем і забезпечувати необхідне обслуговування для підтримки виконання виробничих процесів. Ділова кон'юнктура, що постійно змінюється, і нестабільні сценарії дії виробничих компаній спонукують їх до постійної готовності адаптувати виробничі процеси й виробничі системи до нових умов. У такому контексті необхідна гнучка інфраструктура, що підтримує повну інтеграцію процесів і пристосована до їхнього обслуговування. Стаття представляє семантичні основи інноваційного підходу до обслуговування, що надає можливість адаптивного керування експлуатаційними ресурсами в інтегрованих рамках обслуговуючих структур.

Ключові слова: виробництво, інформація, структура обслуговування

Предвосхищение основанных на знаниях и искусственном интеллекте производственных систем вызывает развитие системных структур, которые могут гибко управлять информационными потоками в параллелях совместно работающих производственных систем и обеспечивать необходимое обслуживание для поддержки выполнения производственных процессов. Постоянно изменяющаяся деловая конъюнктура и нестабильные сценарии действия производственных компаний побуждают их к постоянной готовности адаптировать производственные процессы и производственные системы к новым условиям. В таком контексте необходима гибкая инфраструктура, которая поддерживает полную интеграцию процессов и приспособлена к их обслуживанию. Статья представляет семантические основы инновационного подхода к обслуживанию, предоставляющего возможность адаптивного управления эксплуатационными ресурсами в интегрированных рамках обслуживающих структур.

Ключевые слова: производство, информация, обслуживающая структура

The vision of knowledge-based and intelligent manufacturing systems is driving the development of system architectures, which can seamlessly manage information flows across multiple heterogeneous manufacturing systems and provide the necessary services to support the execution of production processes. Constantly changing business conditions and turbulent scenarios force manufacturing companies to continuously adapt their business processes and manufacturing systems. In such a context, a flexible infrastructure that supports the full integration of processes and adapts its services is needed. This paper presents an innovative se-

semantic service framework that enables the adoption of service lifecycle management (SLM) in an SOA-based integration framework.

Keywords: Manufacturing, Information, Service-oriented Architecture

## 1 INTRODUCTION

Current manufacturing faces constantly changing business conditions and turbulent scenarios that require business processes to be continuously adapted. The vision of adaptive, knowledge-based and intelligent manufacturing focuses on agility and anticipation to permit flexible production through the integration of intelligent systems and processes [1]. Under these circumstances of continuous change and adaptation, the implementation of flexible IT infrastructures that enable the full integration of processes becomes a fundamental requirement in current adaptive manufacturing. The usage of standards and modular system architectures is a key aspect to transform the principles of adaptability and provide adaptive information management in manufacturing environments.

The principles of reusability and loosely-coupled services have made Service-oriented Architecture (SOA) the most used paradigm for software design at the business level. The penetration of SOA in different manufacturing domains can be best observed at the current service-based solutions for Enterprise Resource Planning (ERP) and Supply Chain Management (SCM). In addition to this, the presence of SOA in Business Process Management (BPM) and integration is rapidly growing. For companies that have focused on internal SOA deployments, the leading investment has been application, process and data integration [2], also known as Enterprise Application Integration (EAI). Nowadays, the Enterprise Service Bus (ESB) is one of the leading concepts in EAI. An ESB acts as the backbone of SOA in event-driven enterprises by providing the foundation of a loosely coupled, highly distributed integration network [3]. However, this technology alone is not enough to support the adaptive information services needed in responsive manufacturing environments because of the constant need for adaptation of services. In order to accommodate an EAI infrastructure to a continuous adaptation of the business processes, enterprises need to integrate appropriate Service Lifecycle Management (SLM).

EAI process models following a SOA-based approach, as in current BPM modeling tools, are executed on an ESB, which acts as integration middleware. The configuration of the service bus must be continuously adapted to the changes of EAI processes, or EAI process fragments. In a SOA, process fragments are referred to as services. An integration middleware for adaptive manufacturing needs to incorporate techniques to dynamically reconfigure processes, discover and select suitable services by automated means. These aspects are essential to support EAI process modelers and are among the major research challenges in SLM and SOA governance [4].

The Manufacturing Service Bus (MSB) is a SOA-based approach that extends the Enterprise Service Bus capabilities in three areas: event management, factory context and change propagation workflows. The MSB enables loose coupling between service requesters and providers by brokering requests between them. However, a service bus is not aware of the semantics of information. This fact hinders this integration platform from adopting self-reconfiguration processes, automated discovery of services and dynamic service compositions, which can support business process modelers.

In this paper, we present a semantic service framework as an MSB enhancement that enables the automation of service discovery and dynamic process reconfiguration through semantic annotations. This extension will permit to support EAI process modeling tools, thus optimizing the reconfiguration of processes. Moreover, the presented MSB semantic extension provides the means to adapt the MSB execution infrastructure to changing EAI process models. Our contribution enables the adoption of SLM in an SOA-based integration framework, which will increase the level of automation that is needed in adaptive manufacturing.

In the next section, the service-oriented architecture paradigm is explained along with the current research challenges in SLM. In Section 3, the MSB architecture is described. The semantic service framework and its adoption in the MSB as SLM enhancement are presented in Section 4 and 5, respectively. Related Work is detailed in Section 6 and finally, our conclusions and outlook are given in Section 7.

## 2 SERVICE LIFECYCLE MANAGEMENT

### 2.1 Service-oriented architecture

SOA is a paradigm of designing business applications by using – or reusing – self-contained, independent and discoverable services. Two of the distinguishing principles of SOA are reusability of existing assets and loose coupling of services.

SOA can empower a business with a flexible infrastructure and processing environment by provisioning independent, reusable automated business processes as services [4]. The challenge of integration, the cost of managing IT and the inflexibility to respond to changing requirements are the decisive reasons why most organizations adopt SOA.

Web services represent a common implementation of SOA and part of their success of their adoption is due to the standardization efforts made in describing service interfaces and messaging. These standards support SOAs to follow the “find, bind, invoke” paradigm, where a service provider publishes its service description in a service registry in order for a service consumer to find it,

and then invoke the service through a request/reply mechanism. This communication keystone for web services is known as web service discovery.

Despite the success of web services, identifying reusable services and integrating them as process fragments in executable business processes is not trivial. Here, it is crucial for industries with a high level of service reusability, self-reconfiguration and automation to have a service lifecycle vision and a service management in their integration platforms.

## 2.2 Service lifecycle

A service lifecycle is defined by a series of stages through which an IT service passes during its lifetime. In SOA-based architectures, there is typically a loop that represents the reuse of services in different business processes and its adaptation to different business requirements (see Figure 1). In the pre-design phases, services are planned. In the planning phase, an analysis of the requirements takes place, followed by the identification of possible reusable services. In the design phase, the appropriate service granularity is determined, as well as security, performance and quality of service (QoS) aspects.

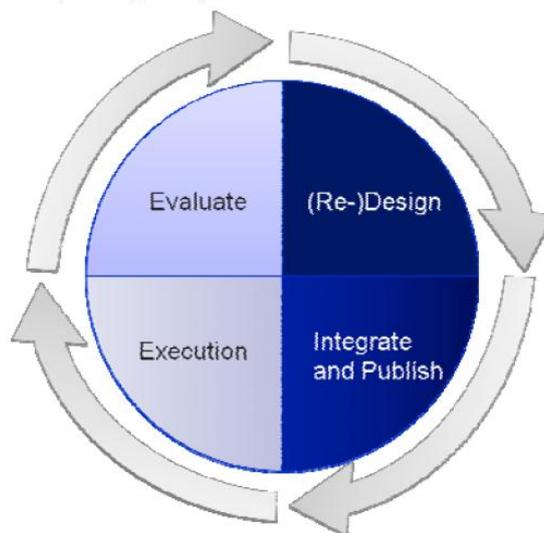


Figure 1 – Service Lifecycle

A service repository with possible reusable, process fragments as well as BPM tools may be used to support the design process. After the design phase, the service is encapsulated and the service configuration is set in the so-called integrate and publish phase. In this phase, the service is also published on a service registry for other services to discover. Additionally, it may be marked as reusable process fragment, depending on its occurrence metrics, business domain and business function. After the service is published, then it is deployed and possibly integrated in other processes. Once a service is deployed, the service begins the execution phase, where a service is operative. Then, in the evaluation phase, service interactions and performance metrics are logged for further analysis in a future re-design phase.

### 2.3 Enabling SOA governance

In order to address these challenges and ensure the success of a SOA-based approach, services are managed according to specific service lifecycle guidelines and implementation methods, which define the SOA governance of a company.

The adoption of SOA in a company involves not only the operational aspects of the services lifecycle management, but also, the management of service design policies, reusability guidelines, service change policies, Service Level Agreements (SLA) and, most important, effectiveness measurement methods. These play a very important role and represent the feedback loop within the SOA governance mechanism of a company. With the proper policy enforcement infrastructure and monitoring system in place, service performance metrics can be contrasted with the specified SLAs. Monitoring is the opportunity for a business to refine its services, start a new service cycle, guarantee SLAs and truly ensure the effectiveness of SOA.

## 3 SERVICE LIFECYCLE IN MANUFACTURING

### 3.1 SOA in event-driven manufacturing

Manufacturing environments present an extremely heterogeneous landscape of equipment and production systems. Applications that exchange production data, communicate with each other following an event-driven pattern. Most interchanged messages are based on some kind of event, alarm or notification, which is due to the nature of production processes. Events are associated with an event emitter and one or more event consumers. In the event emitter, a significant change of state takes place, which generates an event. This generated event is then propagated to the event consumers, which react to the event according to a predetermined procedure or internal, fixed rules. The architecture paradigm for this type of event-centralized communication and integration of systems is known as Event-driven Architecture (EDA) and it is widely adopted in manufacturing environments. Typically an EDA infrastructure enables the detection, propagation and processing of events.

At the business level, manufacturing companies have adapted their business processes to service-oriented paradigms in order to gain flexibility. It's Mostly in the areas of ERP and SCM where SOA has gained more presence. However, the strong penetration of this approach has created a gap between event-driven manufacturing environments and SOA-based business processes. In an event-driven manufacturing environment, businessrelevant events can alter the normal course of business processes entailing turbulent scenarios. Manufacturing companies need an event-driven SOA to have the agility to react to constantly changing business requirements and adapt their business processes. In order to achieve this, the gap between event-driven manufacturing processes and service-oriented business processes needs to be bridged.

### 3.2 The Manufacturing Service Bus

The backbone of SOA in event-driven enterprises is the Enterprise Service Bus (ESB), which combines messaging, data transformation and intelligent routing services to connect distributed applications across an enterprise while assuring reliability and transactional integrity. An ESB infrastructure contains the right mechanisms to enable the required flexible business environment, such as a workflow engine, mediation and content-based routing services. The ESB integration pattern retains centralized control over configuration while allowing for bus infrastructure services, such as message routing or addressing, to be physically distributed. This pattern is especially relevant from the perspective of extending ESB capabilities by deploying new services without affecting the existing infrastructure. Based on this concept, we defined the Manufacturing Service Bus [5] as an ESB with domain-specific services for manufacturing, which aims to fill the gap between EDA-based manufacturing environments and SOA-based business processes.

The MSB enhances the functionalities of an ESB by integrating event management services needed in a manufacturing environment. In this architectural model, five abstraction layers across a manufacturing environment can be distinguished, where the MSB acts as the integration layer (Figure 2).

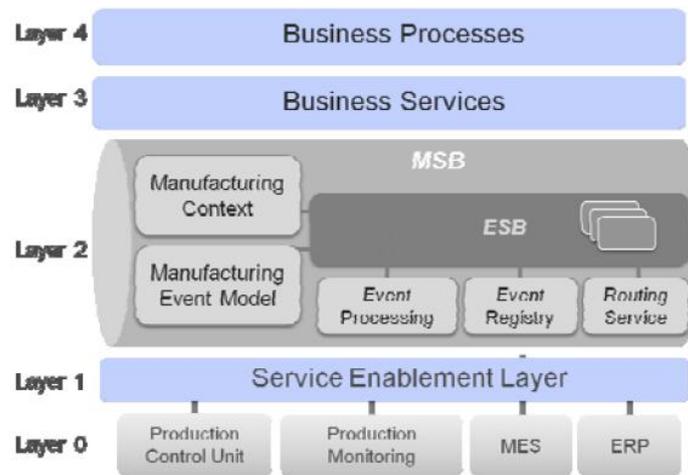


Figure 2 – The Manufacturing Service Bus

Manufacturing systems and digital factory information systems, such as MES, or ERP, are grouped in Layer 0, which forms the source of manufacturing information flows. Layer 1 defines a service enablement layer for all source systems, by providing systems with a service interface. In this layer, service adapters enable manufacturing systems and applications to provide data as services which can be connected to the MSB. Layer 2 facilitates the integration of data provisioning services (Layer 1) into complex business services (Layer 3). In the MSB, event processing and routing components are used to propagate events to the appropriate event consumers.

The MSB uses an XML-based canonical format for event messages, which facilitates event-processing and routing tasks. Event attributes contain information about the nature of the event, the current state of the event as well as routing parameters, such as origin and destination. Extended Schemas are used to extend the event model for different manufacturing sub-domains like maintenance, customer relationship or supply chain. This approach enables the adoption of event processing techniques in a service-oriented computing (SOC) environment, which is one of the most important requirements in order to fill the gap between the SOA-based business processes and the event-driven manufacturing environments. A Workflow Management System enables the orchestration of different business services in Layer 3. Such business services are executable parts of business processes (Layer 4) and can be dynamically adapted, depending on the incoming events.

Nevertheless, an integration framework for adaptive manufacturing, such as the MSB, needs to incorporate techniques to (I) discover and select suitable services by automated means; (II) dynamically analyze and reconfigure business processes; (III) detect problems in service interactions and transparently upgrade and version services without affecting normal operation.

### 3.3 SLM Challenges in Manufacturing

For manufacturing environments that pursue an adaptive manufacturing approach, a high level of service reusability, automation and self-reconfiguration represent the three major requirements. In order for an integration platform to provide the necessary services that fulfill these requirements, a service lifecycle strategy is needed. The implementation of a lifecycle strategy in SOC environments with a high level of automation presents a number of challenges that need to be met:

- In the early phases of design and development of services, business process modeling tools must be aware of existing assets and services. One of the key issues in reusing services is the ability to discover them effectively. For this purpose, only the inherent interface data of a service may not be enough.
- As services are adapted to different business requirements and used – or reused – in composite applications, the need to document changes, updates, versions increases considerably. The reuse of process fragments may become impracticable if services cannot be distinguished from each other or from former versions.
- In addition to this, once services are deployed, reconfiguration of business processes must be aware of the different service dependencies. Upgrading a business process cannot be done blindly, without knowledge about the dependencies between the different process fragments.

These challenges are addressed by the Semantic Service Framework, which is described ahead.

## 4 SEMANTIC SERVICE LIFECYCLE FRAMEWORK

### 4.1 Need for Semantics

Semantics is the study of meaning and usually focuses on the relation between different representations of concepts, or content of data. The use of semantics has been already successful in other fields like linguistics, knowledge representation, and artificial intelligence. Semantic annotations can also be helpful in integration platforms for adaptive manufacturing, where the fully interoperability of systems represent the biggest barrier to achieve the desired degree of automation.

There are four types of information heterogeneity [6]: (I) system heterogeneity, which considers the storage of data in different platforms and operating systems; (II) syntactic heterogeneity, where information sources use different representations and encodings for data; (III) structural or schematic heterogeneity, which considers the storage of data in different formats, data models, structures or schemas; and (IV) semantic heterogeneity, which considers the content of information and its intended meaning. In a highly heterogeneous landscape of information systems, such as manufacturing environments, semantic heterogeneity can be encountered at the data level, where the meaning of data is expressed differently, depending on the residing system. For instance, a customer relationship management (CRM) application using an XML dialect to represent customer orders doesn't necessarily understand the XML dialect of an order management system. A possible solution to the problem of interoperability is to semantically describe the meaning of the terminology of each distributed data using shared concepts. Usually, a shared ontology is used to make clear the relationships and differences between concepts.

However, the semantic interoperability problem can also be encountered at the business process level. For services to interact properly with each other as part of composite applications, which perform more complex functions by orchestrating numerous services and pieces of information, the requester and provider entities must agree on both the service description and semantics that will govern the interaction between them [7]. This implies an agreement between requester and provider. The aspect of semantic interoperability between service requesters and providers can be exploited to solve the challenges exposed in the last section and will be the focus in this section.

### 4.2 A manufacturing service semantic framework

As it was mentioned in Section 3, service discovery is one of the most challenging aspects in the reuse of services. Business process modeling tools must be aware of existing assets and services. Here, the use of semantics to describe existing services provides advanced features that simplify business process modeling, such as automatic semantic-based discovery of services,

autocompletion, and edition of new process and data mediators [8]. These tasks lead to more effective modeling and reduce the time spent in the design phase [9].

The challenge is now how to describe services correctly so that these can be discovered. The method we use is based on service semantic annotations, which is based on associating semantic metadata with resources.

A semantic annotation application enables service modelers to describe services. The description process is very important for later service discovery. The more accurate is the description of a service, the easier are the appropriate services discovered in a semantic search. The description of a service needs to address four types of semantics [10]:

1. Data semantics: description of input and output messages of a service.
2. Functional semantics: definition of the capabilities of a service, that is, a description of its operations.
3. Non-functional semantics: definition of quantitative or non-quantitative constraints related to QoS or policy requirements, such as message encryption.
4. Execution semantics: definition of the execution flow of operations within a service or of services in a process.

The definition of all these aspects of a service gives a detailed description of what a service can do, how it can be done, the conditions under which it can run and its interaction or dependency with other services. When services are semantically described, there are three steps that need to be done: (i) the service data and service operations are semantically annotated, (ii) an inference engine checks for inconsistencies with existing concepts and relationships, and (iii) then the annotated services need to be stored in a semantic service repository. These three steps are very important for later service discovery and reuse.

The presented service semantic annotation framework permits the annotation of services in a manufacturing environment. Event-data service providers describe the input and output data that the service manages as well as the functionality of the service, i.e. the operations of the service, by linking the data and operations in the service interface to the concepts expressed in the domainspecific production ontology. This ontology contains all relevant concepts and relationships of a concrete manufacturing environment. For instance, the meaning of a ‘customer order’, as well as all its attributes, such as the order status, and relationships with other concepts, like customer request, are described. This ontology is populated with instances of the ontology classes, establishing a knowledge base for a concrete manufacturing environment, so that services from different domains, such as ERP, CRM, SCM, can overcome semantic heterogeneity problems.

The annotation and discovery of services is shown in Figure 3. Once the service provider annotates a service, like the MES event-data provider does (1)

in the example, the semantic service engine starts a reasoning process about new knowledge (2), i.e. new service interactions, and service dependencies. Then, the semantic service engine updates the service ontology and feeds the semantic service repository with the new semantic service. Once a service is registered, a service requester can formulate its requirements in a semantic template by using the same terms as those expressed in the production ontology and service ontology. In the example shown in Figure 3, a CRM event consumer service sends this event provider search request (3). The reasoning techniques of the semantic service engine are then used to compare the requirements of the template with the capabilities of the service available in the semantic service repository, allowing services to be discovered by requesters (4). The value of semantics is to provide a much richer description of services as purely syntactical thus providing powerful support for service discovery.

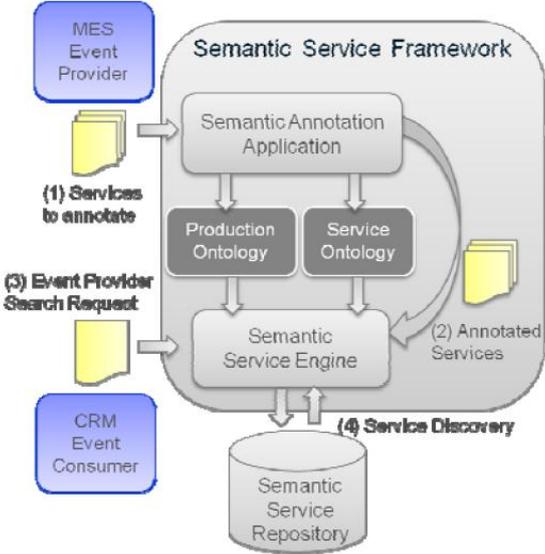


Figure 3 – Semantic Service Framework

Additionally, service providers can include optional descriptions that define preconditions and effects of its operations. Preconditions must be met before the service is invoked and effects are the expected results of invoking an operation. Moreover, a service provider may consider adding a description about non-functional aspects of a service, like quality, reliability or security. These nonfunctional characteristics are the basis for SLA stipulations that allow services to agree on QoS aspects. Finally, service providers can also include execution semantics when describing a service which provides knowledge about service interactions and the dependencies with other services or processes. These are mapped to the concepts expressed in a service ontology, which is populated with instances of the service ontology classes, establishing a knowledge base for service dependencies. This allows, for instance, dynamically establishing new SLAs when a service updates its security policy by discovering service consum-

ers whose semantic description of their requirements match the stated policy. This is the basis for the implementation of a SOA governance strategy.

The benefits of adding semantics is pervasive in the entire lifecycle of a service [10]. The service semantic annotation framework can be used to implement a service lifecycle management system. As it was mentioned in Section 3, one of the major challenges in SLM is the need to document changes, updates and versions of services. In dynamic environments, such as in adaptive manufacturing, services are adapted continuously, i.e. incorporate new functions, update or delete existing functions, etc. Under these circumstances, the needed level of automation cannot be achieved, unless the mechanism for service discovery and process reconfiguration is supported by an adequate service lifecycle management. The architecture described in the next section uses the service semantic annotation framework to implement an SLM component that can be incorporated into service-based integration platforms for manufacturing, like the Manufacturing Service Bus.

## 5 SEMANTICS-ASSISTED SERVICE LIFECYCLE IN THE MANUFACTURING SERVICE BUS

In order to gain the required responsiveness and adaptability in current manufacturing, we must provide the right support for self-reconfiguration of processes and service management in order to increase the level of automation in integration infrastructures. The MSB is a service-based integration platform for manufacturing environments, but with no SLM. The adoption of the framework presented in the previous section provides a SLM implementation that enables service management and versioning, service dependency management and contributes to the self-reconfiguration of processes and automated service discovery, which are considered key technological aspects in integration infrastructures for adaptive manufacturing.

The adoption of the framework in the MSB is based on an SLM strategy. All connected services to the MSB are considered event sources or destinations. As, described in the reference architecture of the MSB, a content-based routing service routes events to their appropriate destinations. This is done thanks to an XML-based canonical event format which services use to send their events to the MSB. Through this event model, our factory integration platform can keep track of events, route messages to the appropriate destinations and perform mediation tasks on messages. The MSB routing service is based on a fixed set of XPath expressions, which evaluate certain nodes in incoming event messages. An example is shown ahead:

```
/*[@eventIdRegistered="true" and
@eventFlowIdRegistered="true" and
not(@eventId="") and
not(@eventFlowId="") and @eventType="85"]
```

The routing service looks up the corresponding destination in its routing tables and determines where to route the message by evaluating the event data. Each event type is mapped to one or more destinations, which process the event messages of that type. Nevertheless, these routing tables have to be edited manually when new service dependencies are established. In addition to this, this person has to be an IT specialist due to the complexity of XPath expressions. These aspects avoid the MSB to provide the desired flexibility when adding new services or when the operations of a service are updated. Therefore, a certain degree of automation needs to be incorporated that supports service management. For these reasons, we propose a semantic approach to enable SLM in our integration platform, and provide the desired degree of automation. This way, when a service is updated, a new version will be registered in the semantic service repository by using the presented semantic service framework. As a consequence, once service dependencies are updated, the routing tables will be automatically updated as well with the corresponding updated routing information for incoming events.

In Figure 4, a scenario to reflect the automatic updates in the routing tables is shown. In the example, a CRM system uploads a description of the new service version (1). Then the routing tables are updated with its new destination (2), s\_CRM\_v2. In this manner, events of type 85 from the MES can be routed to the new destination (see Figure 3). Additionally, all service compositions that contained version 1 of this CRM event consumer need to update the service endpoint as well. Such service dependencies are managed by the semantic service framework, and stored in the service ontology knowledge base.

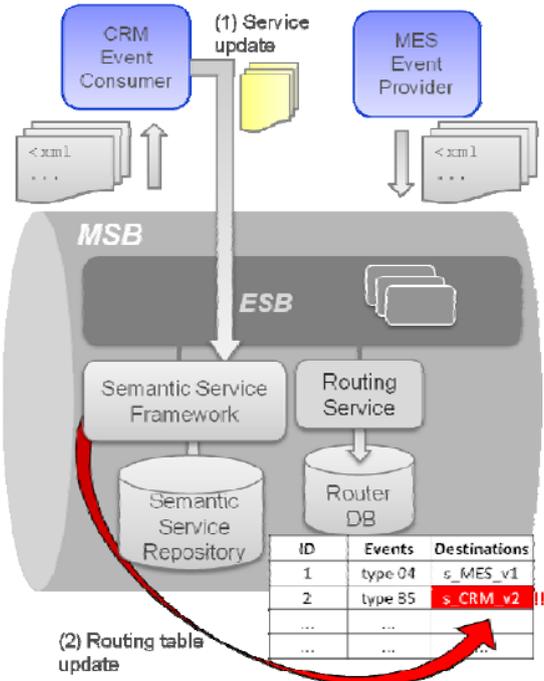


Figure 4 – Semantics-enhanced MSB

## 6 RELATED WORK

The concept of a manufacturing service bus was first introduced by Bienier et al. [11]. This work extends the concept of ESB, adapting the architecture to the manufacturing context. Special attention is paid to the monitoring of QoS parameters. Our work is oriented on the adoption of SLM in the integration middleware in order to achieve a higher degree of automation in service-oriented computing environments for adaptive manufacturing. In this direction, current research activities focus on different areas, namely (i) semantic BPM, (ii) dynamic routing and (iii) event-based SOA.

Semantic Business Process Modeling (SBPM) aims to achieve a higher degree of automation in BPM by using semantic technologies. The functional requirements for each phase of the BPM lifecycle and the benefits of adopting semantic technologies are explored in [9]. The major benefits are automated service discovery and enabling dynamic binding of services to process tasks during process execution. A reference architecture [8] and implementation of a SBPM system has been carried out within the SUPER project [12]. The integration layer is based on a semantic service bus. This contribution is a conceptual architecture and focus on service orchestrations more than routing technologies.

Dynamic routing in service-oriented architectures is another area of research that matches the agility requirements for integration platforms in adaptive manufacturing environments. In this area, dynamic routing processes can be implemented as processes, like in [13], where SOAP message routing logic is expressed in terms of processes, which enables routing by SOAP message processing. In [14], a review of current efforts to adopt content-based routing in SOA is made. These efforts focus on incorporating publish/subscribe technologies, such as the WS-notification standard. However, in most approaches, semantics are not used or only used for service discovery.

A combination of both architecture styles SOA and EDA is introduced in [15]. The result is a model that uses Event-driven Process Chains representing a standardized, event-centric business process notation for modeling the initial processes, which are then transformed into a BPEL process, the web service standard language for executable business processes. This approach uses events to trigger execution of individual business activities, whereas our approach routes events by means of a mediation service bus. The incorporation of semantics to the MSB enables a higher degree of automation, which is one of the fundamental requirements in adaptive manufacturing.

## 7 CONCLUSIONS

The vision of adaptive and knowledge-based manufacturing can only be implemented if the integration infrastructure in a manufacturing environment includes the right SLM, adaptability and automation mechanisms.

The benefits of adding semantics is pervasive in the entire lifecycle of a service. We propose a semantic service framework to implement an SLM system that allows managing services and establishes a knowledge base for service dependencies. This extension will permit to support EAI process modeling tools, thus optimizing the reconfiguration of processes. The presented MSB semantic extension provides the means to adapt the MSB execution infrastructure to changing EAI process models.

In highly dynamic environments, the desired level of automation can only be achieved if service discovery and process reconfiguration are supported by the adequate SLM. We have shown how the semantic service framework can be incorporated into an integration platform, namely the MSB, improving the adaptability and agility of the platform.

#### 8 ACKNOWLEDGMENT

We extend our sincere thanks to the German Research Foundation for financial support of the project within the Graduate School of Excellence advanced Manufacturing Engineering and to the reviewers for the valuable hints.

**REFERENCES:** **1.** *Jovane, F., Westkämper, E., Williams, D.*, 2009, *The ManuFuture Road*, Springer Verlag, Berlin. **2.** *Austvold, E., Carter, K.*, 2005, *Service-Oriented Architectures: Survey Findings on Deployment and Plans for the Future*, AMR Research. **3.** *Chappell, D. A.*, 2004, *Enterprise Service Bus*, O'Reilly, Sebastopol, CA. **4.** *Papazoglou, M., Traverso, P., Schahram, D., Leymann, F.*, 2007, *Service-Oriented Computing: State of the Art and Research Challenges*, IEEE Computer. **5.** *Minguez, J., Lucke, D., Jakob, M., Constantinescu, C.; Mitschang, B., Westkämper, E.*, 2009, *Introducing SOA into Production Environments: The Manufacturing Service Bus*, Proceedings of the 43<sup>rd</sup> CIRP International Conference on Manufacturing Systems (ICMS), pp. 1117-1124, Vienna, Austria. **6.** *Sheth, A. P.*, 1999, *Changing Focus on Interoperability in Information Systems: From System, Syntax, Structure to Semantics, Interoperating Geographic Information Systems*. C. A. Kottman, Kluwer Academic Publisher: 5-29. **7.** *Papazoglou, M.*, 2008, *Web Services: Principles and Technology*. Pearson, Prentice Hall, Harlow. **8.** *Karastoyanova et al.*, 2008, *A Reference Architecture for Semantic Business Process Management Systems*, Multikonferenz Wirtschaftsinformatik. **9.** *Wetzstein, B. et al.*, 2007, *Semantic Business Process Management: A Lifecycle Based Requirements Analysis*, Proceedings of the Workshop on Semantic Business Process and Product Lifecycle Management, ISSN 1613-0073. **10.** *Cardoso J., Sheth, A. P.*, 2006, *Semantic Web Services, Processes and Applications*, Springer. **11.** *Biennier, F., Ali, L., Legait, A.*, 2007, in *IFIP International Federation for Information Processing, Volume 246, Advances in Production Management Systems*, eds. Olhager, J., Persson, F., (Boston: Springer), pp. 87–94. **12.** SUPER – Semantics Utilized for Process Management within and between Enterprises, [www.ip-super.org](http://www.ip-super.org) **13.** *Scheibler, T., Karastoyanova, D., Leymann, F.*, 2009, *Dynamic Message Routing Using Processes*, Proceedings of 16th Fachtagung Kommunikation in Verteilten Systemen (KiVS 09). **14.** *Cugola, G., Di Nitto, E.*, 2008, *On adopting Contentbased Routing in service-oriented architectures*, Information and Software Technology, Elsevier Science, ISSN: 0950-5849. **15.** *Wieland, M., Martin, D., Kopp, O., Leymann, F.*, 2009, *SOEDA: A Methodology for Specification and Implementation of Applications on a Service-Oriented Event-Driven Architecture*, International Conference on Business Information Systems (BIS 2009).

*E. FRANCALANZA, J. C. BORG, Malta*  
*C. C. CONSTANTINESCU, Stuttgart, Germany*

## **A FRAMEWORK SUPPORTING CONCURRENT 'PRODUCT FAMILY AND MANUFACTURING SYSTEM' SYNTHESIS DECISION MAKING**

*Є. ФРАНКАЛАНЗА, ДЖ.К. БОРГ, К.К. КОНСТАНТИНЕСКУ*  
*ПРИЙНЯТТЯ РІШЕННЯ, ЩО ОПИРАЄТЬСЯ НА ІНФРАСТРУКТУРУ, ПРО*  
*ПОГОДЖЕНИЙ СИНТЕЗ "ЛІНЕЙКА ТОВАРІВ І ВИРОБНИЧА СИСТЕМА"*

Ця стаття представляє систему поглядів з випереджальним і обґрунтованим змістовним забезпеченням прийняття зацікавленими сторонами рішення про концептуальний синтез, що підтримує як конструювання лінійки товарів, так і планування виробництва. Переслідується мета підтримки відповідних зацікавлених сторін головним чином шляхом забезпечення інформованості результатом вибору на етапах життєвого циклу як виробничої системи, так і товару. Підтримувана базами знань підтримка також забезпечується у формі рекомендацій з використання виробничих ресурсів і рекомендацій, що допомагають уникнути несподіваних наслідків рішення. Ця система поглядів використана як основа для розвитку базованого на комп'ютерних можливостях інтелектуального інструментарію, що підтримує конкурентне проектування виробничої системи й лінійки товарів.

Ключові слова: ухвалення рішення, планування підприємства, лінійка товарів.

Эта статья представляет систему взглядов с опережающим и обоснованным содержательным обеспечением принятия заинтересованными сторонами решения о концептуальном синтезе, поддерживающем как конструирование линейки товаров, так и планирование производства. Преследуются цели поддержки соответствующих заинтересованных сторон главным образом путем обеспечения осведомленности результатом выбора на этапах жизненного цикла как производственной системы, так и товара. Поддерживаемая базами знаний поддержка также обеспечивается в форме рекомендаций по использованию производственных ресурсов и рекомендаций, помогающих избежать неожиданных последствий решения. Эта система взглядов использована как основа для развития базирующегося на компьютерных возможностях интеллектуального инструментария, который поддерживает конкурентное проектирование производственной системы и линейки товаров.

Принятие решения, планирование предприятия, линейка товаров.

This paper presents a framework for providing both product family design and factory planning stakeholders with proactive and content aware support during conceptual synthesis decision making. The framework aims to support the relevant stakeholders primarily by providing awareness of decision consequence on both manufacturing systems and product life cycle stages. Knowledge based support is also provided in the form of guidance on avoiding unintentional decision consequences and manufacturing resource usage. This framework is used as the basis for the development of an intelligent computer based tool that supports concurrent manufacturing system and product family design.

Keywords: Decision Making, Factory Planning, Product Families.

## 1 INTRODUCTION

Faster technology uptake and increasing customer demands have meant that manufacturing is under a continuous state of change, and new paradigms for the future of manufacturing are being developed [1]. Thus in the modern manufacturing scenario, product development has become a task of fundamental importance for any company. Good product development practices can set a company apart from its competitors, giving it a leading edge in extremely competitive markets.

This said product development is a complex task which involves many stakeholders, each having a different specialisation, such as product design and manufacturing system design, therefore each having different perspectives and aims.

This has led to the development of models such as the Integrated Product Development (IPD) model [2] which is based on the concept of concurrent consideration. In the IPD model product designers and manufacturing system designers work concurrently on developing solutions aimed at satisfying the customers' needs.

With this in mind Borg et al have developed a tool to support product designers during concurrent synthesis decision making [3]. This tool helps product designers by providing an insight into the intended and unintended consequences of decisions made on future life-cycle phases such as the manufacturing system, but also the use, service and disposal phases of a product. As presented by [4] there are also many tools, methods and approaches aimed at providing support for product family and platform design. From a manufacturing perspective several modelling and simulation tools are also provided to support manufacturing system stakeholders [5].

Having said this current tools and methods do not provide explicit support during conceptual stages for concurrent product and manufacturing system design for a group of products.

Therefore the lack of solution to this problem provided the motivation for carrying out this research and achieving the goal of supporting the different stakeholders in product and manufacturing system design for a group of products. This paper presents the hypothesis that relevant product development stakeholders can be supported by providing them with an insight into the intended and unintended consequences on future product families.

This paper starts with explaining the impact of product and factory design decisions on costs and therefore highlighting the importance of supporting factory planning stakeholders during the conceptual design stages.

The concurrent development of Product Families and Manufacturing Systems is then discussed in detail. Based on this discussion the consequence of decisions made during product and family design is presented.

The framework for supporting concurrent ‘product family and manufacturing system’ synthesis decision making is then presented. Finally this paper concludes by presenting the prototype ICT tool which was developed based on this Framework.

## 2 COSTS COMMITTED DURING FACTORY DESIGN

### 2.1 Factory as a System

Based on the theory of systems a product can be decomposed into several system elements. In a similar manner one can also describe a factory as being a system. Westkämper in [1] presents the industrial paradigm “Factory as a Product”, modelling the hierarchical scale of manufacturing.

### 2.2 Factory as a Product

In this manner the production branch of a manufacturing system can be referred to as a Factory. Similarly to a product, the factory also has a life-cycle termed the factory life-cycle [6]. In the factory life-cycle several planning activities precede the ramp-up, factory operation and manufacturing execution phases, and eventually maintenance and recycling or disposal.

### 2.3 Costs Committed During Factory Design

Cooper & Kaplan [7] have developed a model which compares the actual expenditure with the committed costs during the different phases of product design. By analysing this model one can note that during the early stages the incurred costs are low giving a low cost incidence. On the other hand many decisions are taken during these early stages, meaning that the committed costs are significantly larger. For example during conceptual product design, there is still no tooling costs spent since only prototypes are built. This said, during this phase many decisions are made such as material and form that commit investment costs in relative manufacturing processes during future phases.

Therefore by analogy, this paper presents the hypothesis that during the early stages of the Factory Life-Cycle few costs are actually spent, but since many decisions are being made during these stages this means that substantial costs are being committed (Figure 1).

For example during Internal Logistics and Layout Planning, several decisions are made on the material handling systems and the location of different manufacturing processes. The costs at this stage are tied to the wages of the stakeholders. The committed costs on the other hand are high, since the material handling system carries a high cost.

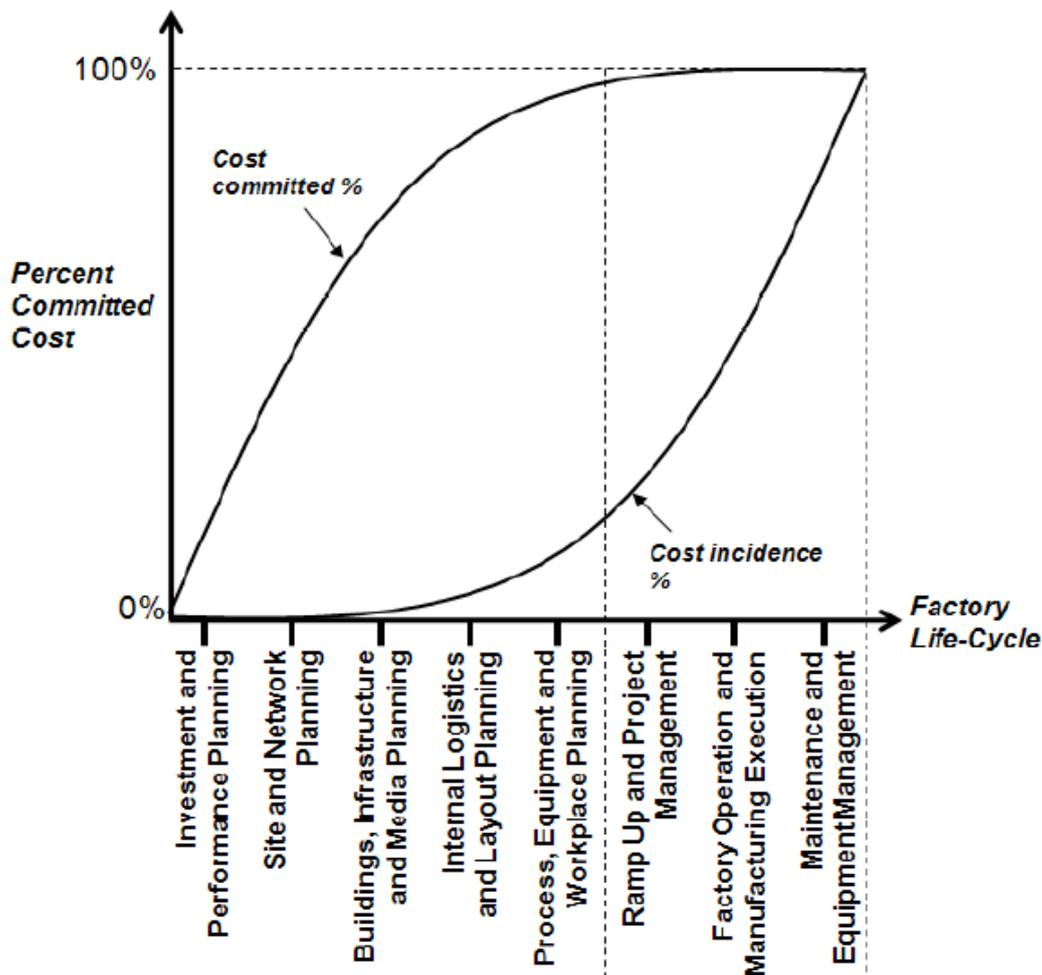


Figure 1 – Costs committed vs. cost incidence during the Factory Life-Cycle

As previously highlighted reduction of planning time also means that there is an increased pressure on stakeholders to take faster decisions. This hypothesis therefore highlights the importance and significance of the conceptual design stages in the factory life-cycle. Hence this leads to the principal of supporting the stakeholders during these stages.

### 3 THE NEED OF CONCURRENT PRODUCT AND MANUFACTURING SYSTEM DEVELOPMENT

This argument has therefore led to an in-depth study of how product development stakeholders can be supported with an emphasis relationship between the product and manufacturing system.

#### 3.1 Product Family Design

One of the solutions adopted within the product development scenarios to achieve a high level of customisation whilst maintaining competitive costs is the introduction of product families and platforms.

Product family design is aimed at making the best use of the large investments made in the areas of product development, manufacturing, and marketing

[8]. Much research work has been carried out in the area of product families and platforms from a product design, manufacturing, production and supply chain management perspective. This has been well documented in [4]. Product families can be generated by having variants at different product levels, i.e. from product level, to subproduct and feature level.

### 3.2 Changeable Manufacturing Systems

Wiendahl in [9] portrays the different classes of Factory Changeability and their relationships to the hierarchy of Product Levels, from Product Portfolio to the individual Workpiece, and Production Levels classes. For example, to achieve Sub-Product Flexibility one has to act at the segment level. These factors, together with the volatile nature of the international markets, mean that manufacturing companies and their facilities have to be flexible and avant-garde, whilst remaining constantly aware of their operating environments. The implementation of transformability in the manufacturing strategy and structure can therefore provide companies with enormous advantages in both market oriented innovation [10].

### 3.3 Concurrent Development

It is now the aim of the authors to highlight the relationship between product family design and the factory life cycle stages.

This paper therefore presents a model that relates product levels the Hierarchic Scales of manufacturing, classes of factory changeability and the factory life cycle stages (Figure 2).

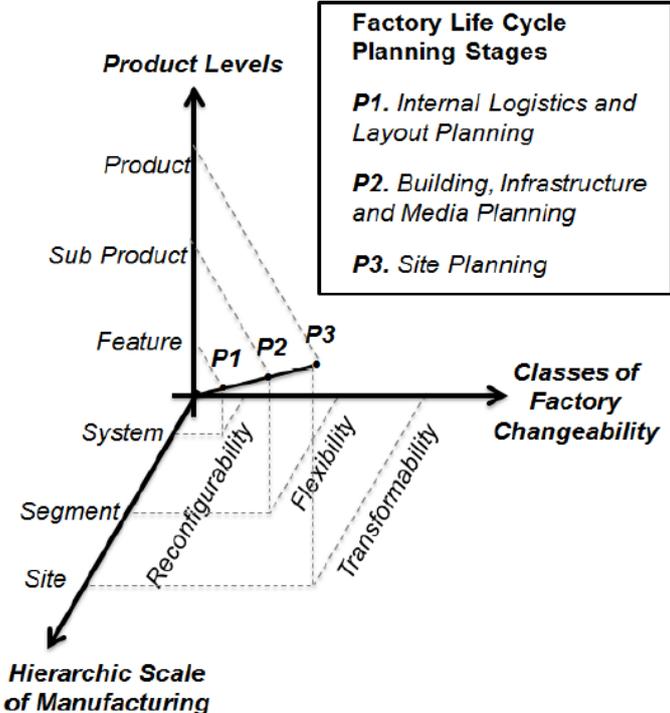


Figure 2 – Relationship between product, manufacturing systems and changeability

Therefore if a product designer aims to achieve product variability at the product level, this means that this has to be taken into consideration during the site planning stages. This is done during the design of the site and by integrating the principles of factory transformability.

Hence it becomes crucial to support the manufacturing system designer during the site planning stage with the information and knowledge required to achieve the degree of factory transformability to cater for the required product variation.

### 3.4 Co-Evolution

Furthermore throughout their lifetime product families and manufacturing systems are continuously evolving, new features or parts may be added or replaced to the current range of products. If one had to take the example of an automobile, product ranges may be updated with the introduction of new engine platforms. This represents one of the main difficulties in designing manufacturing systems which cope with product families due to their ever changing nature, especially during the life cycle of the manufacturing system [11] and [12].

This means that decisions made during the planning phases of the manufacturing system have outstanding consequences on both the life cycle of the system and also on the future product families and platforms which can be produced by the system.

## 4 A FRAMEWORK SUPPORTING DECISION MAKING IN PRODUCT FAMILY AND FACTORY DESIGN

In the development of the proposed framework it was decided to support concurrent product family and manufacturing system during synthesis decision making. Before explaining the framework it is therefore important to understand and be aware of the process which has been identified

### 4.1 Synthesis Decision Making Process

During design synthesis decision commitments are reflected in the evolving solution models. In the scenario being proposed design synthesis occurs both during the product design process and during the factory design process (Figure 3).

In the case of the product design process, the designer may want to find a solution to having a locating feature on a part. For this problem a number of options may be available, such as having a round or square form. The designer done makes a synthesis commitment action, and the chosen option is added to the evolving product model.

This decision may have several consequences on different life stages. One of these consequences is the limitation on the available options for the factory designer. This consequence is the link between product design process and the factory planning process.

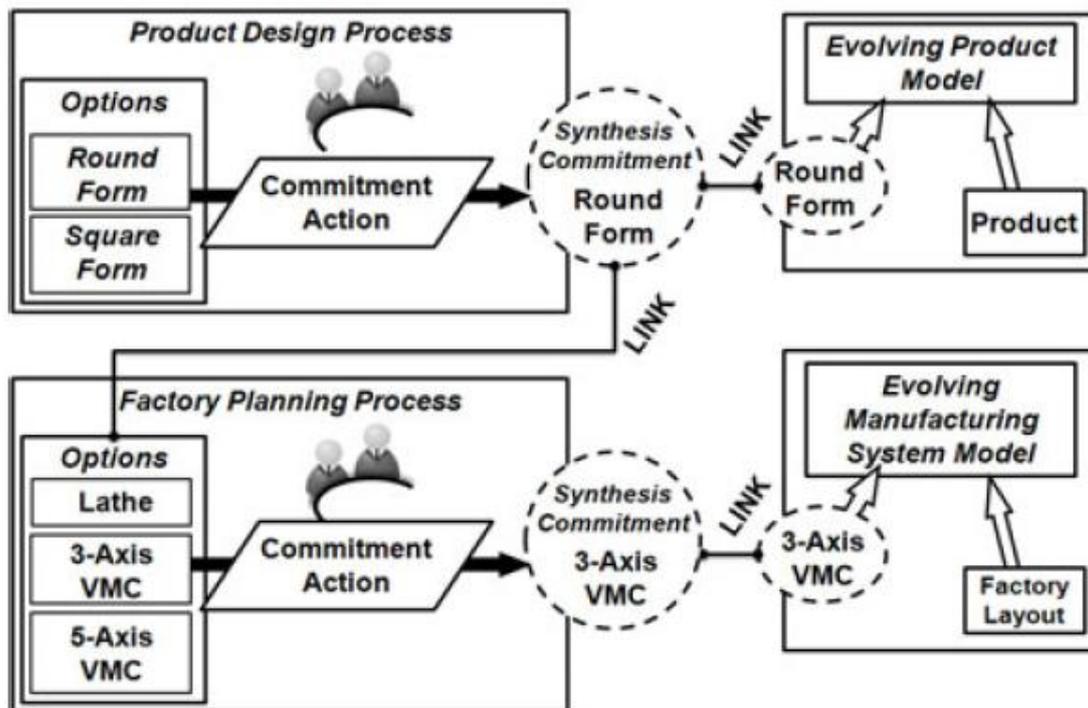


Figure 3 – Product and Factory synthesis decision making processes

The designer now faces the problem of finding a manufacturing solution to creating a round form. From the options available the factory designer has to choose a solution, such as the use of a 3 axis vertical machining centre. This synthesis commitment is added to the evolving manufacturing system model. This decision also has consequences on future factory life phases, such as the location and type of services which need to be installed to operate this process.

Another example may be the decision of the factory designer to use the welding process to join the parts together. This has a consequence that all other products in the range of products, since these now have to be manufactured of the same material; otherwise this manufacturing system will not be capable of manufacturing the future product range.

#### 4.2 A Framework Supporting Decision Making

It is therefore being proposed that the level of product variability is impacted by decisions made during synthesis decision making in factory planning. Furthermore these decisions are made throughout the different phases of the Factory Life Cycle Planning, and therefore support is required throughout this process during synthesis decision making.

This research therefore proposes two methods which can provide support during this delicate design stage. The first one is to make both product and factory designers aware of consequences of decisions made of current and future product families. The second is to provide a visual feedback on the unutilized manufacturing system potential.

### 4.3 Awareness of Decision Consequences

This leads to the importance of making the product and factory designers aware of the consequences of their decisions on future product variants.

If in the case of the above example the factory designer is made aware of the consequence of choosing the welding process on the limitation for future product variants, then a different decision may be done. This information is therefore required during the synthesis stage, where several options are made available to the factory designer, and only one can be committed.

### 4.4 Unutilized Resource Potential

It would therefore be ideal for the manufacturing industry to have its product development stakeholders (Product Designers and Factory Designers) aware of the consequences of their decisions, especially when these are unintended. A possible method would be to portray graphically the product variability with respect to a number of Indicators. These indicators would be a set of variables such as geometry, size and weight of the product (Figure 4).

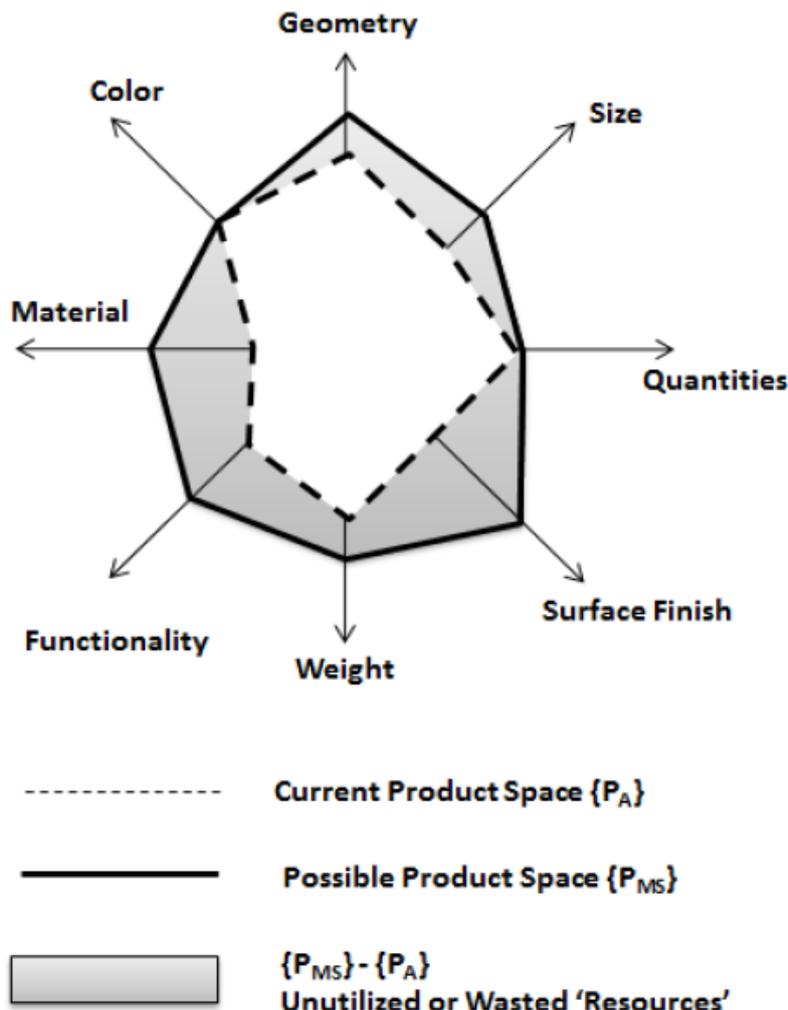


Figure 4 – Product Variability and Unutilized Resource Potential

This method would compare the current product or product family space (i.e. the features of the current product – weight, material, color, etc.) with the possible product space that can be handled by the manufacturing system being designed (i.e. what types of geometry, quantities and surface finish that the manufacturing system can handle).

This means that both the product designer and the factory designer would have a visual reference that makes them aware of the readily available but unutilized potential. In this way during synthesis design, decisions can be made to allow for either greater flexibility in the design, or to opt to make a better use of the wasted resources.

For example in the first scenario a manufacturing system designer has to choose between a number of options for a material handling system. These options may include a fixed position pick and place system a gantry type pick and place and a robotic arm. These three different options give the designer different levels of flexibility in material handling of parts of different size, weight and geometry.

This method will provide the designer with a visual representation of the flexibility which the different options have on the current product (Do they satisfy the requirements of the current product?) and on future possible products (How different can possible future variants be to be accommodated on the same manufacturing system?). In this way the designer will be supported during synthesis decision making, and can therefore make a better informed decision.

## 5 UNDERLYING FRAMEWORK DEVELOPMENT

The underlying framework philosophy, allows the product designer and factory planner to explore a number of different product and manufacturing system solutions with respect to their changeability and product space. The product space is understood to be the range of products which can be produced by the manufacturing system. Therefore this approach framework aims to reveal and analyse the consequences of commitments made during the factory planning stages on the possible product space, and hence on product families (Figure 5).

The framework illustrated in Figure 5 is therefore being developed to support the factory planning processes by proactively providing the necessary information and required guidance.

More importantly, it focuses on “product family and manufacturing system” synthesis decision making. In this way support is provided when the system solution model is still evolving and therefore helping to proactively foresee and optimize as early as possible the range of product families that can be handled during the product and factory life-cycles.

## 5.1 Operational Frame

As the product design solution evolves, the product designer and factory planner start to concurrently solve sub-problems encountered in both product and manufacturing system design.

The commitments made are based on a set of intentions, preferences and circumstances. This means that the factory planner might commit to different decisions based on the company's current economic circumstances.

The product designer and factory planner will then interact with a synthesis element library. This library can be restricted depending on the product level flexibility required. The stakeholders can then search the options for a solution to the sub-problems encountered.

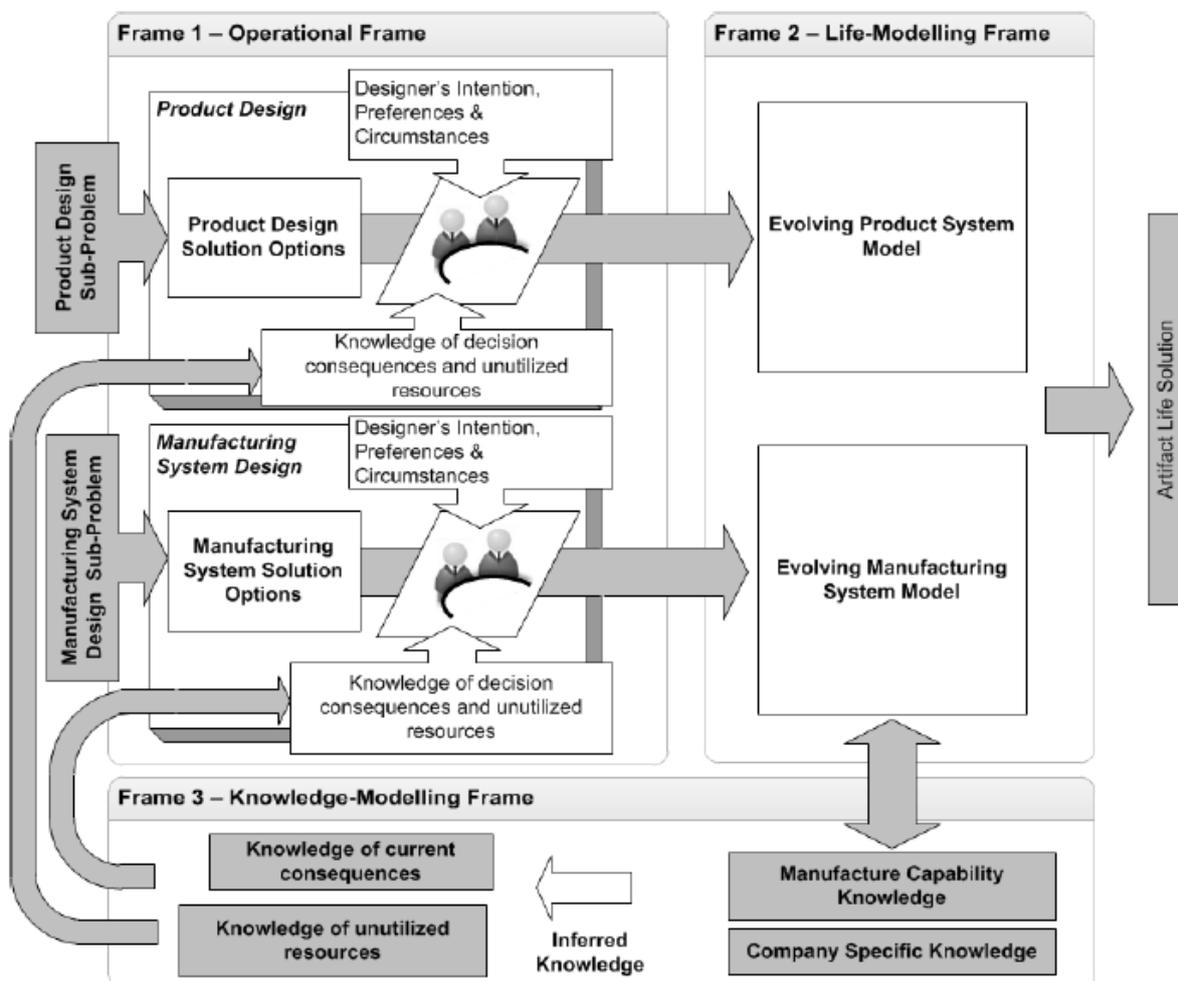


Figure 5 – Framework Supporting Concurrent 'Product Family and Manufacturing System' Synthesis Decision Making

## 5.2 Life-Modelling Frame

Once the product designer and factory planner commit to a solution these commitments are added to the evolving system models.

Therefore if the product designer commits to having a plastic part, then this will be reflected in the evolving product model. This will therefore drive the factory planner into solving the manufacturing system sub problem of manufacturing this plastic part. From a set of options, such as machining, plastic injection molding or extrusion, the factory designer can then commit to a process to manufacture this part.

This commitment will then be added to the evolving manufacturing system model. Together the evolving product and manufacturing models make up the artifact life solution.

### 5.3 Knowledge Modelling Frame

Modelling knowledge is an essential part of a decision support system [13]. Since it has been established that support for concurrent decision synthesis is required, it becomes clear that knowledge about both the evolving manufacturing system and the co-evolving product design solution is required, since decisions made at each end affects the other. Therefore from the previously explained relationships between products, manufacturing systems and changeability one can elicit the type of knowledge and knowledge structuring which is required to foresee the consequences on product variability from decisions made, and therefore provide feedback to the user.

Therefore within this frame the evolving product and manufacturing system models are constantly being monitored to infer knowledge of current consequences of decisions made and the evolving product space model.

This knowledge is inferred based on previously gathered knowledge of manufacturing capability and company specific knowledge.

Support is therefore provided by providing this knowledge to the product designer and factory planner. In this method the stakeholder can proactively monitor the effect of the solution elements chosen on the product families which can be produced by the manufacturing system in development.

## 6 ICT PROTOTYPE FRAMEWORK IMPLEMENTATION

An ICT Tool is being developed to evaluate and demonstrate the concepts which have been discussed in this paper. This tool for Manufacturing System Design Synthesis (MANUSYDS) support was implemented with the use of the JAVA programming language to provide both the Graphical User Interface (GUI) and business end operations.

The aim of this ICT prototype is to enable the concurrent development of the product family and the manufacturing system which will be producing it. It therefore implements the concepts developed by the previously discussed

framework into a tangible solution. The domain chosen for this implementation level is the manufacture and assembly of plastic components.

As is illustrated in Figure 6 the implementation consists of an ICT tool that makes use of tabs, control boxes, drop downs and tick boxes that allows the factory planner and product designer to explore several solutions for the manufacturing design problem that is being tackled. All the decisions which have been committed to by the factory planner are then represented in the evolving manufacturing system model on the right of the GUI in real time.

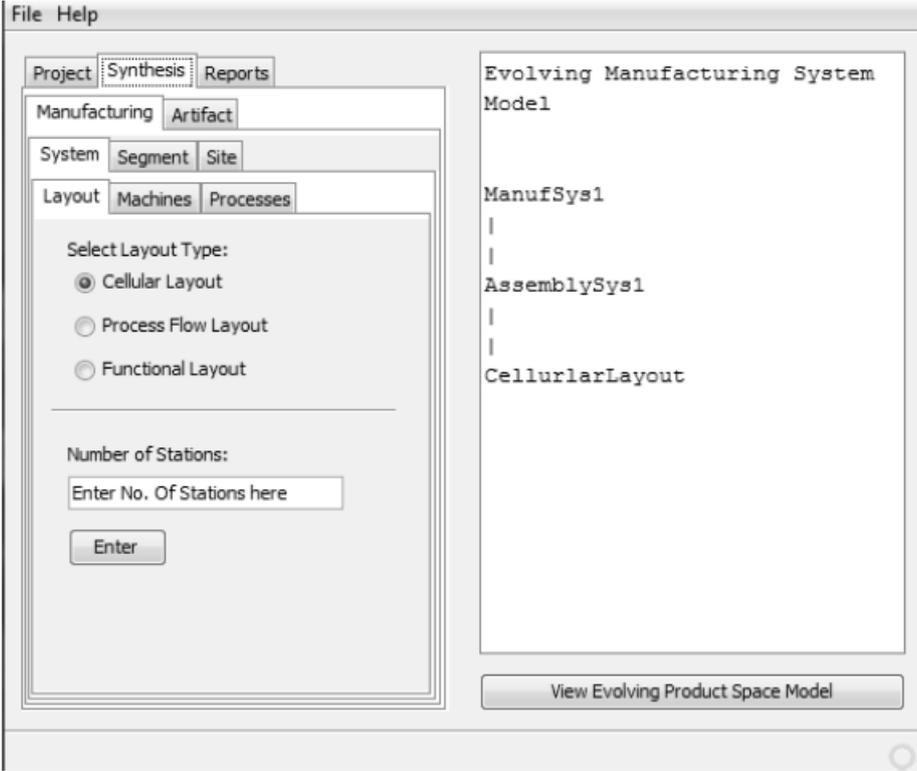


Figure 6 – MANUSYDS

Once the product designer makes a number of product design synthesis decisions, and the evolving product model is available to the tool, the factory planner concurrently starts to develop the manufacturing system. The GUI is then interfaced with an expert system tool. MANUSYDS uses the C Language Integrated Production System (CLIPS) environment to implement a rule and object based expert system. CLIPS is a public domain software.

Based on the previously described underlying framework and the rules and knowledge programmed using the CLIPS interface the MANUSYDS Tool evaluates the product space as the manufacturing model evolves. The product and manufacturing system designers can then view the evolving product space model as decisions are being made.

This work can be defined as a preliminary experimental analysis, since all testing has been carried out under laboratory conditions by researchers, and has not yet been evaluated by Factory Planners in a real scenario.

## 7 CONCLUSIONS AND FUTURE WORK

The arguments presented in this paper highlight that need for product designers and factory planners to be supported during decision making activities. These stakeholders should take into consideration the consequences of decisions made during product and manufacturing synthesis design on the product families that can be handled by the evolving and future manufacturing system.

This hypothesis was the fundamental concept behind developing a framework and ICT Tool to support the factory planner by proactively foreseeing and optimizing as early as possible the range of product families that can be handled by the evolving manufacturing system. The next step of this research is to carry out an evaluation in industry, with the use of a number of case studies and concrete industrial data, to prove the validity of the arguments being proposed by this research work.

## 8 ACKNOWLEDGMENTS

The first author would like to thank the University of Malta for the financial assistance provided for carrying out PhD research visits to the IFF/IPA, University of Stuttgart through the Research Grant “Digital Planning and Simulation for the Factory of the Future” (Vote No. 31- 394).

**REFERENCES:** 1. *E. Westkämper*, “New Trends in Production,” *Reconfigurable Manufacturing Systems and Transformable Factories*, 2006, pp. 15-26. 2. *M.M. Andreasen and L. Hein*, *Integrated Product Development*, London: IFS Publ. and Berlin/Heidelberg: Springer - Verlag, 1987. 3. *Borg, J.C. and Yan, X.T.*, “Design decision consequences: Key to 'Design For Multi-X' support,” 1998, pp. 169-184. 4. *J. Roger Jiao, T. Simpson, and Z. Siddique*, “Product family design and platform-based product development: a state-of-the-art review,” *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 18, Feb. 2007, pp. 5- 29. 5. *A. Scheibe, C. Constantinescu, M. Decker, and E. Westkämper*, “A comprehensive and holistic approach of multi-scale modelling and simulation of manufacturing systems,” 2006. 6. *C. Constantinescu and E. Westkämper*, “A Reference Model for Factory Engineering and Design,” *Proceedings of the 6th CIRP-Sponsored International Conference on Digital Enterprise Technology*, 2010, pp. 1551-1564. 7. *R. Cooper and R.S. Kaplan*, *Design of Cost Management Systems*, Prentice Hall, 1998. 8. *J.I.M. Halman, A.P. Hofer, and W.V. Vuuren*, “Platform-Driven Development of Product Families: Linking Theory with Practice,” *Journal of Product Innovation Management*, vol. 20, 2003, pp. 149- 162. 9. *H. Wiendahl, H. ElMaraghy, P. Nyhuis, M. Zäh, H. Wiendahl, N. Duffie, and M. Brieke*, “Changeable Manufacturing - Classification, Design and Operation,” *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, vol. 56, 2007, pp. 783-809. 10. *E. Westkämper*, “Factory Transformability: Adapting the Structures of Manufacturing,” *Reconfigurable Manufacturing Systems and Transformable Factories*, 2006, pp. 371-381. 11. *H. ElMaraghy*, “Reconfigurable Process Plans For Responsive Manufacturing Systems,” *Digital Enterprise Technology*, 2007, pp. 35-44. 12. *H.A. ElMaraghy, Ed.*, *Changeable and Reconfigurable Manufacturing Systems*, London: Springer London, 2009. 13. *J.C. Borg, X. Yan, and N.P. Juster*, “Exploring decisions' influence on life-cycle performance to aid design for Multi-X,” *Artif. Intell. Eng. Des. Anal. Manuf.*, vol. 14, 2000, pp. 91-113.

## ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ

УДК 621.922.04

**Ю.Н. ВНУКОВ**, д-р техн. наук, **А.С. САЛЬНИКОВ**, канд. техн. наук,  
**А.Г. САРЖИНСКАЯ**, Запорожье, Украина

### ИССЛЕДОВАНИЕ АДГЕЗИОННОЙ АКТИВНОСТИ КАРБИДНЫХ И НИТРИДНЫХ ПЛЕНОК К РАЗЛИЧНЫМ МЕТАЛЛАМ И СПЛАВАМ

Робота присвячена дослідженню адгезійної активності карбідних і нитридних плівок до різних металів і сплавів. Розроблено діапазон адгезійної активності розглянутих зсувів. Установлено, що рівень адгезійної активності залежить від атомного радіуса й параметрів кристалічної решітки.

Данная работа посвящена исследованию адгезионной активности карбидных и нитридных пленок к различным металлам и сплавам. Разработан диапазон адгезионной активности рассматриваемых смещений. Установлено, что уровень адгезионной активности зависит от атомного радиуса и параметров кристаллической решетки.

*JU.N. VNUKOV, A.S. SAL'NIKOV, A.G. SARZHINSKAJA*  
*RESEARCH OF ADHESIVE ACTIVITY OF CARBIDE AND NITRID LAYER TO VARIOUS METALS AND ALLOYS*

The research of nitride and carbide depositions adhesive activity to different work materials is shown. Ranges of adhesive activity of considered depositions are developed. It has been assigned that level of adhesive activity of deposition depends on atomic radius and lattice spacing.

В настоящее время около 75 % режущего инструмента различных производителей имеют многослойные защитные покрытия на основе нитрида и карбида титана и других материалов, наносимые методами физического осаждения паров [1]. Такое широкое применение покрытий объясняется тем, что при рациональном использовании они позволяют в значительной мере повысить стойкость режущего инструмента. Повышение стойкости достигается за счет изменения условий трения на контактных поверхностях инструмента вследствие уменьшения их адгезионной активности по отношению к обрабатываемому материалу. Таким образом, адгезионная активность контактных поверхностей инструмента является ключевой характеристикой при выборе оптимального покрытия для обработки того или иного материала.

Для оценки адгезионной активности карбидных и нитридных пленок использовался метод, подробно описанный в работе [2]. Он позволяет при помощи трибометра осуществлять измерение сил, возникающих на границе раздела ювенильных поверхностей покрытия и обрабатываемого материала при пластических деформациях последнего. Другими словами, из-

меряется приращение сил трения при образовании металлических связей (схватывании), возникающих на граничных поверхностях в условиях постоянного увеличения площади контакта. В качестве обрабатываемых материалов были выбраны конструкционная сталь 45, нержавеющая сталь аустенитного класса 12X18H10T и высокочистый титан ВТ-1-00.

Полученные экспериментально-расчетным путем коэффициенты относительной адгезионной активности сопряженных систем «карбид MeC/обрабатываемый материал» и «нитрид MeN/обрабатываемый материал» представлены в табл. 1 и 2. Для каждой пары выполняли в среднем от 4 до 6 экспериментов. Результаты экспериментов подвергали обработке методами математической статистики [3]. Определяли среднеквадратичное отклонение  $\sigma_n$ , коэффициент вариации  $V$  и доверительный интервал  $\pm \Delta$ .

Таблица 1 – Коэффициент относительной адгезионной активности карбидов к стали 45 и 12X18H10T

Инструментальный материал		Обрабатываемый материал					
		Сталь 45			12X18H10T		
		$\Delta F / S_{cp}$	$\pm \Delta$	$K_{адг}$	$\Delta F / S_{cp}$	$\pm \Delta$	$K_{адг}$
Р6М5 (эталон)		0,140	0,016	1,00	0,35	0,025	1,00
То нк ие пл ен ки	TiC	0,081	0,014	0,58	0,096	0,013	0,27
	ZrC	0,345	0,020	2,46	0,478	0,035	1,37
	HfC	0,299	0,013	2,14	0,831	0,026	2,37
	VC	0,147	0,013	1,05	0,082	0,010	0,23
	NbC	0,035	0,004	0,25	0,232	0,030	0,66
	CrC	0,073	0,021	0,52	0,16	0,023	0,46
	Mo2C	0,006	0,001	0,04	0,082	0,008	0,23

Таблица 2 – Коэффициент относительной адгезионной активности нитридов к стали 45 и 12X18H10T

Инструментальный материал		Обрабатываемый материал					
		Сталь 45			12X18H10T		
		$\Delta F / S_{cp}$	$\pm \Delta$	$K_{адг}$	$\Delta F / S_{cp}$	$\pm \Delta$	$K_{адг}$
Р6М5 (эталон)		0,140	0,015	1,00	0,35	0,034	1,00
Тон кие пле нки	TiN	0,046	0,008	0,33	0,07	0,016	0,20
	ZrN	0,100	0,005	0,71	0,28	0,040	0,80
	HfN	0,075	0,010	0,54	0,27	0,017	0,77
	VN	0,052	0,002	0,37	0,08	0,014	0,23
	NbN	0,0085	0,002	0,06	0,226	0,029	0,65
	CrN	0,072	0,017	0,51	0,178	0,024	0,51
	Mo2N	0,115	0,010	0,82	0,115	0,026	0,33

На основании выполненных исследований трения в условиях схватывания были построены ряды адгезионной активности карбидов и нитридов переходных металлов к различным металлам и сплавам.

Ряд адгезионной активности карбидов к стали 45 в порядке ее возрастания будет иметь вид:

$\text{Mo}_2\text{C}$ ,  $\text{NbC}$ ,  $\text{CrC}$ ,  $\text{TiC}$ ,  $\text{P6M5}$ ,  $\text{VC}$ ,  $\text{HfC}$ ,  $\text{ZrC}$  / сталь 45.

Соответственно, к стали 12X18H10T:

$\text{VC}$ ,  $\text{Mo}_2\text{C}$ ,  $\text{TiC}$ ,  $\text{CrC}$ ,  $\text{NbC}$ ,  $\text{P6M5}$ ,  $\text{ZrC}$ ,  $\text{HfC}$  / 12X18H10T.

В связи с тем, что титан обладает повышенными свойствами схватывания, при измерении силы трения тонкая пленка исследуемого карбида разрушается на шаровом образце. Поэтому было выполнено ограниченное число экспериментов, и на основании их результатов записан ряд активности, который имеет приближенный вид:

$\text{Mo}_2\text{C}$ ,  $\text{CrC}$ ,  $\text{NbC}$ ,  $\text{VC}$ ,  $\text{TiC}$ ,  $\text{HfC}$ ,  $\text{ZrC}$  / титан.

Анализ полученных результатов свидетельствует, что карбид молибдена  $\text{Mo}_2\text{C}$  обладает аномально низким схватыванием со сталью 45. Если коэффициент адгезии стали P6M5 к стали 45 принять за 1, то  $K_{адг}$  карбида молибдена равен 0,04, т.е. применение пленки  $\text{Mo}_2\text{C}$  в двадцать пять раз снижает схватывание инструмента с обрабатываемым материалом.

Карбид ниобия имеет относительно низкое схватывание с конструкционными углеродистыми сталями ( $K_{адг} = 0,25$ ) и проявляет достаточно высокое схватывание с нержавеющей стали аустенитного класса ( $K_{адг} = 0,66$ ). Карбид ванадия наоборот, сильно схватывается с углеродистыми сталями ( $K_{адг} = 1,05$ ) и обладает низкой адгезионной активностью к нержавеющей стали ( $K_{адг} = 0,23$ ).

Карбид хрома в среднем в 2 раза снижает схватывание инструмента с обрабатываемыми материалами – сталями 45 и 12X18H10T.

Карбид титана имеет невысокое схватывание с нержавеющей сталью ( $K_{адг} = 0,27$ ) и повышенную адгезионную активность к углеродистым сталям ( $K_{адг} = 0,58$ ).

В результате выполненных исследований выявлена связь адгезионной активности с межатомными расстояниями сопряженных материалов. Карбиды  $\text{HfC}$  и  $\text{ZrC}$ , имеющие наиболее высокие значения радиуса атомов и периодов решетки, демонстрируют постоянно высокое схватывание со всеми исследуемыми обрабатываемыми материалами.

Ряд адгезионной активности нитридов переходных металлов к стали 45 имеет следующий вид:

$\text{NbN}$ ,  $\text{TiN}$ ,  $\text{VN}$ ,  $\text{CrN}$ ,  $\text{HfN}$ ,  $\text{ZrN}$ ,  $\text{Mo}_2\text{N}$ ,  $\text{P6M5}$  / сталь 45

Соответственно, ряд активности нитридов к нержавеющей стали аустенитного класса 12X18H10T:

$\text{TiN}$ ,  $\text{VN}$ ,  $\text{Mo}_2\text{N}$ ,  $\text{CrN}$ ,  $\text{NbN}$ ,  $\text{HfN}$ ,  $\text{ZrN}$ ,  $\text{P6M5}$  / 12X18H10T.

По причине разрушения пленок из-за высокого схватывания с титаном ряд активности нитридов к нему представлен ориентировочно:

CrN, VN, NbN, Mo<sub>2</sub>N, TiN, HfN, ZrN / титан

Анализ результатов исследований показывает, что нитрид ниобия NbN обладает аномально низким схватыванием с углеродистыми сталями, наряду с высокой адгезией к стали 12X18H10T.

Нитрид титана TiN имеет самую низкую, из всех исследованных нитридов, адгезионную активность к нержавеющей стали 12X18H10T и проявляет невысокое схватывание с конструкционным сталям. Это является одной из причин эффективного использования покрытия из нитрида титана при обработке сплавов на основе железа. Нитрид титана, также как и карбид TiC, проявляет повышенную адгезионную активность к титану, что объясняется сродством контактируемых пар. Минимум схватывания с титаном получен для нитрида хрома CrN, что указывает на перспективы его использования в качестве верхних поверхностных слоев при обработке материалов на основе титана.

Сравнение результатов исследования схватывания карбидов и нитридов переходных металлов, показывает, что карбиды проявляют более высокую адгезионную активность к различным металлам и сплавам. Этим подтверждаются выводы, согласно которым карбиды сильнее, чем нитриды, проявляют металлический тип связи и сильнее схватываются с металлами. В частности, сравнение данных схватывания тугоплавких соединений титана, наиболее применяемых в качестве защитных поверхностных слоев, указывает на то, что карбид TiC в 1,75 раз выше проявляет адгезионную активность в отношении углеродистых сталей, чем нитрид TiN.

Полученные результаты исследования адгезионной активности нитридов и карбидов тугоплавких соединений свидетельствуют о преобладающем влиянии на схватывание межатомных расстояний (радиус атома, период решетки) контактирующих материалов. Нитриды циркония и гафния, например, имеющие наиболее высокие значения периода решетки среди нитридов, обладают повышенной адгезионной активностью ко всем рассмотренным обрабатываемым материалам.

**Список использованных источников:** 1. Von den Berg H. at el. Влияние внутренних напряжений покрытий на износ инструмента // *Werkstatt und Betrieb*. - 2005. - V. 138. Nr. 9 – С. 50-54. 2. Внуков Ю.Н. Нанесение износостойких покрытий на быстрорежущий инструмент / Ю.Н. Внуков, А.А. Марков, Л.В. Лаврова. — К.: Техніка, 1992. — 143с. 3. Кацев П.Г. Статистические методы исследования режущего инструмента / Кацев П.Г. - М.: Машиностроение, 1968. - 155с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Von den Berg H. at el. Vlijanie vnutrennih naprjazhenij pokrytij na iznos instrumenta // *Werkstatt und Betrieb*. - 2005. - V. 138. Nr. 9 – S. 50-54. 2. Vnukov Ju.N. Nanesenie iznosostojkih pokrytij na bystrorezhuwij instrument / Ju.N. Vnukov, A.A. Markov, L.V. Lavrova. — K.: Tehnika, 1992. — 143s. 3. Kacev P.G. Statisticheskie metody issledovanija rezhuwego instumenta / Kacev P.G. - M.: Mashinostroenie, 1968. - 155с.

**В.Л. ДОБРОСКОК**, д-р техн. наук, **Л.Н. АБДУРАЙИМОВ**,  
**С.И. ЧЕРНЫШОВ**, канд. техн. наук, Харьков, Украина

## **КРИТЕРИИ КАЧЕСТВА ТРИАНГУЛЯЦИИ 3D МОДЕЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ**

У статті розглянуті критерії якості триангуляції 3D моделей промислових виробів, одержуваних в САD-системах для наступної матеріалізації інтегрованими технологіями (Rapid Prototyping). Розглянуті існуючі й запропоновані нові узагальнені нормалізовані критерії, що дозволяють підвищити рівень оцінки якості триангуляції.

В статье рассмотрены критерии качества триангуляции 3D моделей промышленных изделий, получаемых в САD-системах для последующей материализации интегрированными технологиями (Rapid Prototyping). Рассмотрены существующие и предложены новые обобщенные нормализованные критерии, позволяющие повысить уровень оценки качества триангуляции.

*V.L. DOBROSKOK, L.N. ABDURAJIMOV, S.I. CHERNYSHOV*  
*CRITERIA OF THE TRIANGULATION QUALITY 3D MODELS OF INDUSTRIAL PRODUCTS*

The article considers the quality criteria of the triangulation of 3D models of industrial products, obtained in CAD-systems for further materialization by integrated technologies (Rapid Prototyping). Reviewed existing and proposed new summarized and normalized criteria to improve the quality evaluation of the triangulation.

### *Постановка проблемы*

Высокие требования к техническим характеристикам промышленных изделий, получаемых технологиями Rapid Prototyping, определяют необходимость использования качественных исходных 3D моделей.

Современные системы твердотельного 3D моделирования, оперируют объектами, называемыми телами. В общем случае твердотельный объект может быть построен на базе связанных поверхностей различных типов, ограничивающих занимаемую телом часть пространства. Могут использоваться как плоские, так и криволинейные поверхности различных порядков. При подготовке моделей для последующей материализации используются только плоские поверхности. Тогда такие тела называют многогранниками [8] (полигонами, плоскогранными или фасеточными) [4]. Криволинейные поверхности аппроксимируют системой треугольных или четырехугольных плоских граней с использованием специальных алгоритмов преобразования. Процесс, при котором формообразующие поверхности твердого тела аппроксимируются системой треугольных граней, назы-

вается дискретизацией или триангуляцией (триангулированием) [5]. В свою очередь, треугольники могут быть как криволинейными, так и прямолинейными. Применительно к технологиям Rapid Prototyping рассматривается только триангуляция прямолинейными треугольниками.

Для практических целей используются различные методы триангуляции. Все методы триангуляции по принципу построения можно разбить на два больших класса: прямые [3] и итерационные [2] (рис. 1).

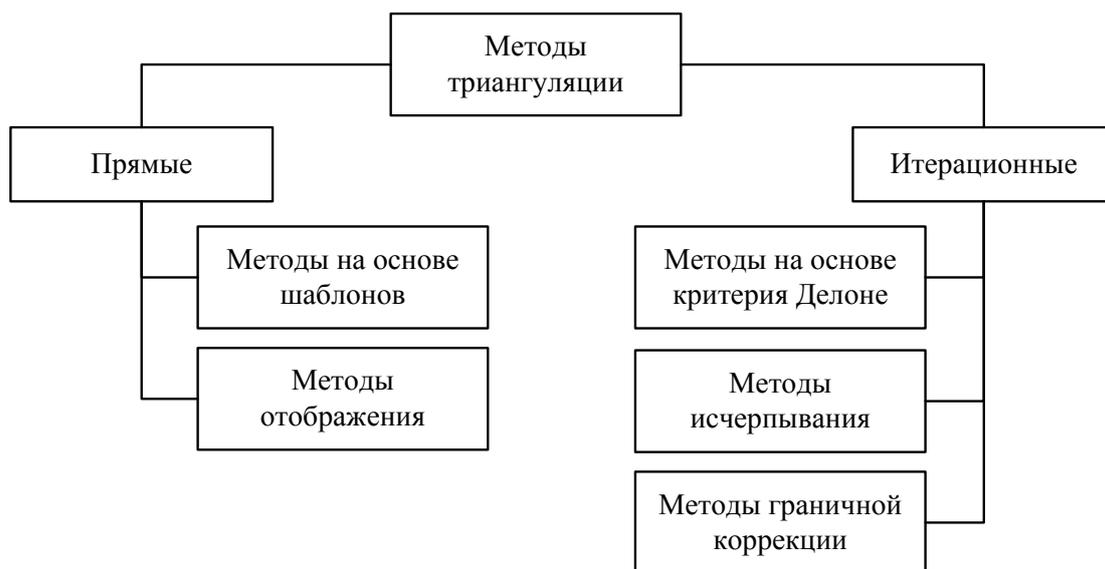


Рисунок 1 – Классификация методов триангуляции по принципу построения

По сфере применения можно выделить две схемы триангуляции (рис. 2):

- двумерная, когда плоский многоугольник покрывается множеством треугольников (рис. 2, а);
- трехмерная, которая может использовать в качестве элементов аппроксимации, как плоские треугольники (рис. 2, б), так и тетраэдры (рис. 2, в). В первом случае поверхность модели покрывается множеством связанных и неперекрывающихся между собой 4-х треугольников  $\{V_1V_2V_3, V_1V_4V_2, V_3V_2V_4, V_1V_3V_4\}$ . Во втором случае внутренний объем трехмерного тела разбивается на множество неперекрывающихся между собой 8-ми тетраэдров  $\{V_1V_5V_8V_{10}, V_2V_5V_6V_7, V_3V_7V_9V_{10}, V_4V_6V_8V_9, V_5V_6V_7V_{10}, V_5V_6V_8V_{10}, V_6V_7V_9V_{10}, V_6V_8V_9V_{10}\}$ .

Качество изготавливаемых промышленных изделий достигается за счет использования достаточно точных и корректных триангуляционных 3D моделей. Причем качество триангуляции зависит как от количества треугольников, так и от их геометрических характеристик.

Поскольку триангуляционная модель формируется на базе твердотельной CAD модели изделия, то следует выявить связь критериев качества с аппроксимационными свойствами триангуляционной модели.

#### *Анализ литературы*

Качество модели существенно зависит от геометрических характеристик элементов аппроксимации [6; 7]. В настоящее время, применительно к трехмерной триангуляции моделей изделий тетраэдрами, предложено достаточно много специальных критериев качества [3; 7; 9-11].

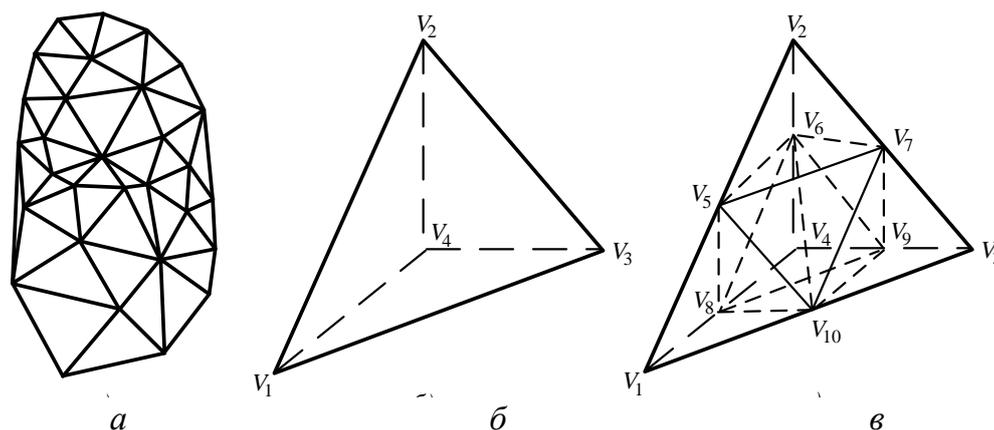


Рисунок 2 – Схемы триангуляции: а – двумерная триангуляция; б – трехмерная триангуляция треугольниками; в – трехмерная триангуляция тетраэдрами

В табл. 1 приведены критерии качества с расчетными формулами, интервалами возможных значений и оптимальными значениями, которые рассчитаны для идеального случая – правильного тетраэдра. Значения приведены с точностью до 6 значащих цифр.

Основным недостатком приведенных критериев является различие интервалов возможных значений (табл. 1), что существенно затрудняет оценку качества триангуляции 3D моделей.

*Цель статьи* – рассмотреть существующие и предложить новые обобщенные нормализованные критерии, позволяющие повысить уровень оценки качества триангуляции.

#### *Изложение основного материала*

В результате анализа была предложена система обобщенных нормализованных критериев качества триангуляции: дифференциальных (на уровне треугольников) и интегральных (на уровне модели в целом). Нормализация критериев обеспечивается путем ввода в расчетные зависимости нормализующих коэффициентов для приведения интервалов возможных значений к единому диапазону (0, 1]. Значение 0 (левая граница интервала возможных значений) критерии принимать не могут в связи исключения из рассмотрения вырожденных треугольников с нулевыми линейными и угловыми характеристиками. Оптимальные значения критериев рассчитывались для случая правильного треугольника и для всех критерии-

ев соответствуют 1 (правая граница интервала возможных значений). Условно критерии качества триангуляции можно разделить на две группы – на базе линейных и угловых характеристик треугольников.

Таблица 1 – Критерии оценки качества трехмерной триангуляции 3D моделей [3; 11]

Критерий качества	Формула	Интервал возможных значений	Оптимальное значение
Отношение радиуса описанной сферы $R$ к радиусу вписанной $r$	$\beta = \frac{R}{r}$	$1, +\infty$	3.0
Отношение длины наибольшего ребра $l_{\max}$ к радиусу вписанной сферы $r$	$\sigma = \frac{l_{\max}}{r}$	$1, +\infty$	4.898979
Отношение радиуса описанной сферы $R$ к длине наибольшего ребра $l_{\max}$	$\omega = \frac{R}{l_{\max}}$	$\left[ \frac{1}{2}, +\infty \right)$	0.612375
Отношение длин наибольшего ребра $l_{\max}$ к наименьшему $l_{\min}$	$\tau = \frac{l_{\max}}{l_{\min}}$	$1, +\infty$	1.0
Отношение 4-й степени объема тетраэдра $V$ к кубу суммы квадратов площадей граней $S_i$	$k = \frac{V^4}{\left( \sum_{i=1}^4 S_i^2 \right)^3}$	0,1	$4.572474 \cdot 10^{-4}$
Отношение куба среднеарифметического длин ребер $l_i$ к объему тетраэдра $V$	$\alpha = \frac{\left( \sum_{i=1}^6 l_i \right)^3}{216V}$	$1, +\infty$	8.485281
Отношение куба среднего геометрического длин ребер $l_i$ к объему тетраэдра $V$	$\gamma = \frac{\left( \prod_{i=1}^6 l_i \right)^{1/2}}{V}$	$1, +\infty$	8.485281
Наибольший двугранный угол $\delta$	$\delta$	$\left[ \arccos \frac{1}{3}, \pi \right)$	$\arccos \frac{1}{3}$ (1.230959)
Среднее отношение $\eta$	$\eta = \frac{12 \ 3V^{2/3}}{\sum_{i=1}^6 l_i^2}$	0,1	1.0
Минимальный телесный угол $\theta$	$\theta$	$\left( 0, \frac{\pi}{2} \right]$	$\frac{\pi}{2}$

Применительно к единичному элементу триангуляционной модели (рис. 3) приведем дифференциальные критерии качества:

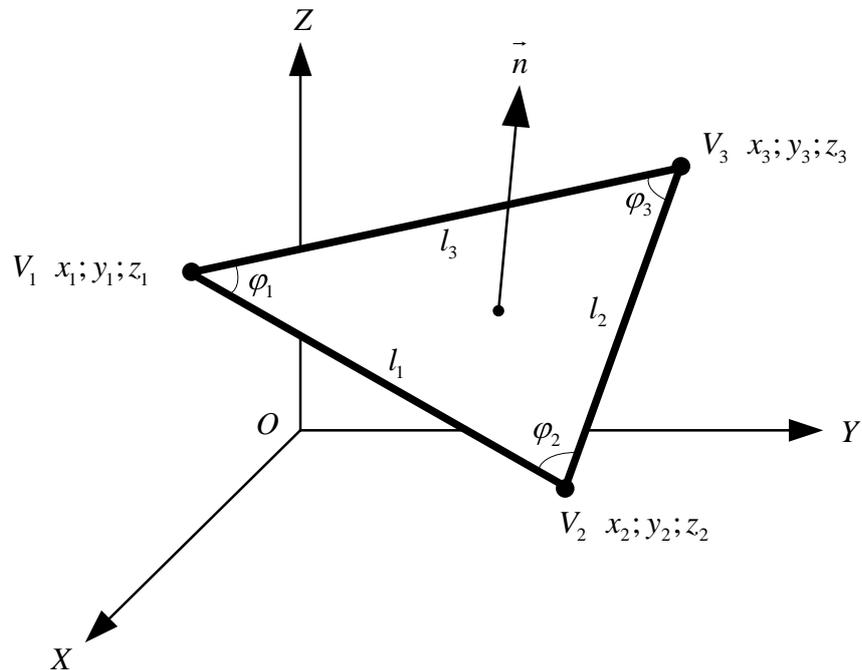


Рисунок 3 – Единичный элемент триангуляционной модели  $V_1V_2V_3$ :  
 $\vec{n}$  - нормальный вектор;  $l_1, l_2, l_3$  - стороны;  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$  - внутренние углы.

• отношение длины наименьшей стороны треугольника  $l_{\min} = \text{MIN}(l_1, l_2, l_3)$  к радиусу описанной окружности  $R$ :

$$Q_1 = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{l_{\min}}{R}; \quad (11)$$

• отношение радиуса вписанной окружности  $r$  к длине наибольшей стороны треугольника  $l_{\max} = \text{MAX}(l_1, l_2, l_3)$ :

$$Q_2 = 2\sqrt{3} \frac{r}{l_{\max}}; \quad (12)$$

• отношение радиуса вписанной окружности  $r$  к радиусу описанной  $R$ :

$$Q_3 = 2 \frac{r}{R}; \quad (13)$$

• отношение длин наименьшей стороны треугольника  $l_{\min} = \text{MIN}(l_1, l_2, l_3)$  к наибольшей  $l_{\max} = \text{MAX}(l_1, l_2, l_3)$ :

$$Q_4 = \frac{l_{\min}}{l_{\max}}; \quad (14)$$

• отношение площади треугольника  $S$  к сумме квадратов длин его сторон  $l_1^2 + l_2^2 + l_3^2$ :

$$Q_5 = 4\sqrt{3} \frac{S}{\sum_{i=1}^3 l_i^2}; \quad (15)$$

• отношение наименьшего  $\varphi_{\min} = \text{MIN}(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3)$  угла треугольника к наибольшему  $\varphi_{\max} = \text{MAX}(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3)$ :

$$Q_6 = \frac{\varphi_{\min}}{\varphi_{\max}}; \quad (16)$$

• отношение площадей вписанных  $S_r$  и описанных  $S_R$  окружностей треугольника:

$$Q_7 = 4 \frac{S_r}{S_R}; \quad (17)$$

• отношение площади треугольника  $S$  к квадрату длины наибольшей его стороны  $l_{\max}^2 = \text{MAX}(l_1, l_2, l_3)^2$ :

$$Q_8 = \frac{4}{\sqrt{3}} \frac{S}{l_{\max}^2}. \quad (18)$$

Из приведенного списка критериев качества можно исключить критерии  $Q_7, Q_8$ , т. к. они являются производными от  $Q_3, Q_5$  соответственно, тогда критерии  $Q_1 \dots Q_6$ , будут являться наиболее представительными.

В качестве основных интегральных критериев качества триангуляции в работе рассматривались:

• среднее арифметическое значений дифференциальных критериев качества:

$$Q_a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Q_i; \quad (19)$$

где:  $N$  – количество элементов триангуляции;

• среднее гармоническое значений дифференциальных критериев качества:

$$Q_g = N / \sum_{i=1}^N \frac{1}{Q_i}. \quad (20)$$

Особенностью среднего гармонического, как общего показателя качества модели, является повышенная чувствительность к появлению отдельных малых значений.

Сравнительный анализ качества триангуляции систем 3D моделирования промышленных изделий выполнялся для наиболее распространенных CAD-систем: *SolidWorks*, *PowerSHAPE*, *КОМПАС-3D*, *T-FLEX Parametric CAD*, *AutoCAD*, *Geomagic Studio*, *MeshLab*, *Magics*. В качестве тестовых моделей были выбраны базовые геометрические тела, наиболее часто используемые в машиностроении: куб, цилиндр, конус и сфера (рис. 4). Предварительные расчеты показали, что наиболее целесообразно использовать критерий  $Q_2$  – отношение радиуса вписанной окружности к длине наибольшей стороны треугольника.

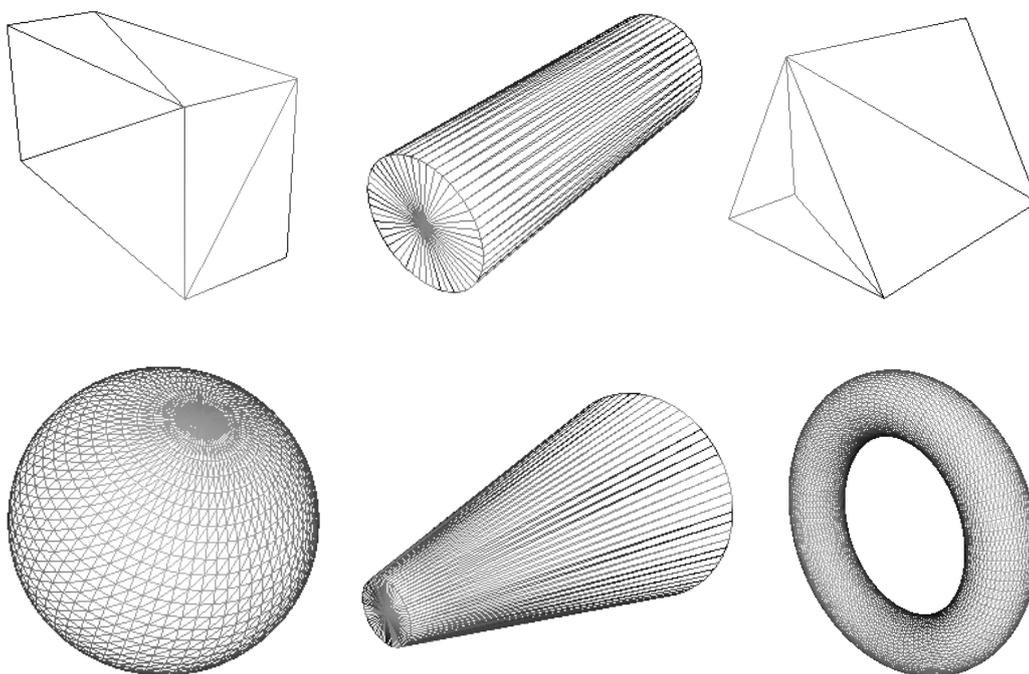


Рисунок 4 – Базовые объекты, используемые при твердотельном моделировании изделий: прямоугольная и треугольная призмы, цилиндр, сфера, конус и тор.

Значения интегральных критериев качества триангуляции тестовых моделей приведены в табл. 2. Для каждой модели указано количество элементов (треугольников и вершин), полученных при экспорте из соответствующей CAD-системы в триангуляционное представление. Параметры экспорта модели выбирались по умолчанию. Отличия в количестве элементов аппроксимации у одинаковых моделей свидетельствует о применении CAD-системами различных собственных алгоритмов триангуляции. В таблице также приведены минимальные  $Q_{\min}$ , средние арифметические  $Q_a$  и гармонические  $Q_g$  значения выбранного критерия качества.

Таблица 2 – Экспериментальные значения критериев оценки качества триангуляционных моделей

Тестовая модель	CAD-система	Кол-во элементов		Качество, $Q \in [0, 1]$		
		треуг.	вершин	$Q_{\min}$	$Q_a$	$Q_g$
Куб ( $a = 200 \text{ мм}$ )	<i>SolidWorks 2008</i>	12	8	0,35872	0,35872	0,35872
	<i>PowerSHAPE 2010</i>	12	8	0,35872	0,35872	0,35872
	<i>КОМПАС-3D 11</i>	12	8	0,35872	0,35872	0,35872
	<i>T-FLEX Parametric CAD 11</i>	140	72	0,04804	0,30850	0,21761
	<i>AutoCAD 2011</i>	12	8	0,35872	0,35872	0,35872
	<i>Geomagic Studio 10</i>	192	98	0,35872	0,35872	0,35872
	<i>MeshLab 1.3.0</i>	12	8	0,35872	0,35872	0,35872
	<i>Magics 12.0.1.2</i>	12	8	0,35872	0,35872	0,35872
Цилиндр ( $R = 100 \text{ мм}$ , $H = 200 \text{ мм}$ )	<i>SolidWorks 2008</i>	220	112	0,02438	0,04635	0,04325
	<i>PowerSHAPE 2010</i>	888	446	0,00608	0,01275	0,01119
	<i>КОМПАС-3D 11</i>	124	64	0,00447	0,07619	0,05120
	<i>T-FLEX Parametric CAD 11</i>	444	224	0,03662	0,14455	0,12541
	<i>AutoCAD 2011</i>	148	76	0,03594	0,06532	0,06432
	<i>Geomagic Studio 10</i>	312	158	0,30246	0,35467	0,34209
	<i>MeshLab 1.3.0</i>	144	74	0,07192	0,10513	0,09464
	<i>Magics 12.0.1.2</i>	896	450	0,01206	0,01801	0,01604
Конус ( $R = 100 \text{ мм}$ , $H = 200 \text{ мм}$ )	<i>SolidWorks 2008</i>	110	57	0,02185	0,04392	0,04102
	<i>PowerSHAPE 2010</i>	774	386	0,00004	0,00762	0,00038
	<i>КОМПАС-3D 11</i>	62	33	0,00420	0,07222	0,04870
	<i>T-FLEX Parametric CAD 11</i>	422	213	0,03662	0,16329	0,09494
	<i>AutoCAD 2011</i>	74	39	0,03594	0,06187	0,06110
	<i>Geomagic Studio 10</i>	228	116	0,09328	0,25275	0,18891
	<i>MeshLab 1.3.0</i>	72	38	0,06493	0,10163	0,08838
	<i>Magics 12.0.1.2</i>	448	226	0,01080	0,01737	0,01488
Сфера ( $R = 100 \text{ мм}$ )	<i>SolidWorks 2008</i>	5852	2928	0,06709	0,29839	0,24515
	<i>PowerSHAPE 2010</i>	85384	42694	0,01706	0,32824	0,28585
	<i>КОМПАС-3D 11</i>	930	467	0,14898	0,31115	0,28619
	<i>T-FLEX Parametric CAD 11</i>	4970	2487	0,07237	0,29909	0,24845
	<i>AutoCAD 2011</i>	1368	686	0,12602	0,30560	0,27440
	<i>Geomagic Studio 10</i>	528	266	0,17975	0,31530	0,29688
	<i>MeshLab 1.3.0</i>	1280	642	0,44216	0,46491	0,46439
	<i>Magics 12.0.1.2</i>	48840	24422	0,02410	0,29242	0,20732

Анализ результатов (табл. 2) позволяет ранжировать рассмотренные 3D CAD-системы моделирования по степени убывания качества триангуляции следующим образом: Geomagic Studio, MeshLab, КОМПАС-3D, AutoCAD, T-FLEX Parametric CAD, SolidWorks, PowerSHAPE и Magics.

#### *Выводы*

Предложенные новые обобщенные нормализованные критерии позволяют существенно повысить уровень оценки качества триангуляции 3D моделей. Нормализация критериев обеспечивается путем ввода в расчетные зависимости нормализующих коэффициентов для приведения интервалов возможных значений к единому диапазону (0, 1]. Оптимальные значения соответствуют 1 (правильный треугольник).

Сравнительный анализ качества триангуляции систем 3D моделирования промышленных изделий для наиболее распространенных CAD-систем: *SolidWorks*, *PowerSHAPE*, *КОМПАС-3D*, *T-FLEX Parametric CAD*, *AutoCAD*, *Geomagic Studio*, *MeshLab*, *Magics* показал работоспособность предложенного подхода.

Результаты работы создают методологическую основу для последующего изучения характеристик триангуляционных моделей.

**Список использованных источников:** 1. Возможности современных САД систем при переходе к триангулированным моделям / В.Л. Доброскок, Я.Н. Гаращенко, С.И. Чернышов [и др.] // Високі технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. – 2010. – Вип. 1 (20). – С. 79-86. 2. Галанин М.П. Разработка и реализация алгоритмов трехмерной триангуляции сложных пространственных областей: итерационные методы / Галанин М.П., Щеглов И.А. – М.: ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 2006. – № 9. – 32 с. - (Препринт / РАН, ИПМ им. М.В. Келдыша ; 06-01-00421). 3. Галанин М.П. Разработка и реализация алгоритмов трехмерной триангуляции сложных пространственных областей: прямые методы / Галанин М.П., Щеглов И.А. – М.: ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 2006. – № 10. – 32 с. – (Препринт / РАН, ИПМ им. М.В. Келдыша ; 06-01-00421). 4. Голованов Н.Н. Геометрическое моделирование / Н.Н. Голованов. – М.: Изд-во Физ.-мат. лит., 2002. – 472 с. 5. Скворцов А.В. Обзор алгоритмов построения триангуляции Делоне / А.В. Скворцов // Вычислительные методы и программирование. – 2002. – Т.3. – С. 14-39. 6. Сьярле Ф. Метод конечных элементов для эллиптических задач / Ф. Сьярле; пер. с англ. Б.И. Квасова. – М.: Изд-во «Мир», 1980. – 512 с. 7. Шайдуров В.В. Много-сеточные методы конечных элементов / В.В. Шайдуров. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат.

лит., 1989. – 288 с. **8.** Энциклопедия элементарной математики: В 5 т. / Физматгиз. – М., 1963. – Т. 4: Геометрия. – 568 с. **9.** Mesh Generation for Technology CAD in Three Dimensions [Электронный ресурс] / *P. Fleischmann* // Dissertation. - 1999. - Режим доступа: <http://www.iue.tuwien.ac.at/phd/fleischmann/diss.html>. **10.** Sequential and Parallel Generation of Unstructured 3D Meshes [Электронный ресурс] / *D. Rypl* // Thesis. – 2005. – Режим доступа: <http://power2.fsv.cvut.cz/~dr/papers/Thesis>. **11.** *Zheng Y.* Three-dimensional unstructured mesh generation: Part 3. Volume meshes / *Y. Zheng, R.W. Lewis, D.T. Gethin* // *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* – 1996. – Vol. 134. – P. 285-310.

**Bibliography (transliterated):** 1. Vozmozhnosti sovremennyh CAD sistem pri perehode k triangulirovannym modeljam / V.L. Dobroskok, Ja.N. Garawenko, S.I. Chernyshov [i dr.] // *Visoki tehnologii v mashinobuduvanni: zb. nauk. prac'.* – 2010. – Vip. 1 (20). – S. 79-86. 2. Galanin M.P. Razrabotka i realizacija algoritmov trehmernoj trianguljicii slozhnyh prostranstvennyh oblastej: iteracionnye metody / Galanin M.P., Weglov I.A. – М.: IPM im. M.V. Keldysha RAN, 2006. – № 9. – 32 s. - (Preprint / RAN, IPM im. M.V. Keldysha ; 06-01-00421). 3. Galanin M.P. Razrabotka i realizacija algoritmov trehmernoj trianguljicii slozhnyh prostranstvennyh oblastej: prjamyje metody / Galanin M.P., Weglov I.A. – М.: IPM im. M.V. Keldysha RAN, 2006. – № 10. – 32 s. – (Preprint / RAN, IPM im. M.V. Keldysha ; 06-01-00421). 4. Golovanov N.N. Geometricheskoe modelirovanie / N.N. Golovanov. – М.: Izd-vo Fiz.-mat. lit., 2002. – 472 s. 5. Skvorcov A.V. Obzor algoritmov postroeniya trianguljicii Delone / A.V. Skvorcov // *Vychislitel'nye metody i programmirovanije.* – 2002. – Т.3. – S. 14-39. 6. S'jarle F. Metod konechnyh jelementov dlja jellipticheskikh zadach / F. S'jarle; per. s angl. B.I. Kvasova. – М.: Izd-vo «Mir», 1980. – 512 s. 7. Shajdurov V.V. Mnogo-setochnye metody konechnyh jelementov / V.V. Shajdurov. – М.: Nauka. Gl. red. fiz.-mat. lit., 1989. – 288 s. 8. Jenciklopedija jelementarnoj matematiki: V 5 t. / Физматгиз. – М., 1963. – Т. 4: Geometrija. – 568 s. 9. Mesh Generation for Technology CAD in Three Dimen-sions [Jelektronnyj resurs] / *P. Fleischmann* // Dissertation. - 1999. - Rezhim dostupa: <http://www.iue.tuwien.ac.at/phd/fleischmann/diss.html>. 10. Sequential and Parallel Generation of Unstructured 3D Meshes [Jelektronnyj resurs] / *D. Rypl* // Thesis. – 2005. – Rezhim dostupa: <http://power2.fsv.cvut.cz/~dr/papers/Thesis>. 11. *Zheng Y.* Three-dimensional unstructured mesh generation: Part 3. Volume meshes / *Y. Zheng, R.W. Lewis, D.T. Gethin* // *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* – 1996. – Vol. 134. – P. 285-310.

*Г.К. КРЫЖНЫЙ*, канд. техн. наук, Харьков, Украина

## **ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ В ДВУХ ЦИКЛАХ ЕЕ ЖИЗНИ**

В статті аналізуються особливості двох циклів життя продукції, а саме цикл життя товарного продукту та цикл життя конкретного виробу, а також взаємозв'язок споріднених етапів цих двох циклів. Показується подібність відповідних циклів життя для матеріальної продукції з різних галузей та значні відмінності для сфери послуг. Ключові слова: цикл життя товарного продукту, цикл життя виробу, взаємозв'язок циклів, якість продукції.

В статье анализируются особенности двух циклов жизни продукции, а именно цикл жизни товарной продукции и цикл жизни изделия, а также взаимосвязь родственных этапов этих двух циклов. Показывается сходство соответственных циклов жизни для материальной продукции с разных отраслей и значительные отличия для сферы услуг. Ключевые слова: цикл жизни товарного продукта, цикл жизни изделия, взаимосвязь циклов, качество продукции.

*G. K. KRYZHNYI*

### *MAINTENANCE OF QUALITY OF PRODUCTION IN TWO CYCLES OF ITS LIFE*

The article covers the analysis of peculiarities of product life cycle, particularly life cycle of marketable products and item life cycle, as well as the interdependence between the related phases of the two cycles. The similarities of the corresponding life cycles for material products of different areas and significant distinctions for service industries are researched. Keywords: life-cycle of the product, life cycle of commodity products, link cycles, the quality of the products.

В работе [1] анализируются проблемы обеспечения качества продукции на разных этапах жизненного цикла продукции. При этом цикл жизни продукции предприятия предлагается рассматривать в двух аспектах (рис. 1).

С одной стороны, это цикл жизни товарного продукта, то есть период времени от появления новой идеи и ее воплощения в новом продукте до его морального старения и снятия с производства. В этот цикл жизни входит изучение рынка, разработка изделия, подготовка производства, организация производства, коммерциализация продукта. Для него характерны стратегические решения и проводимые политики: маркетинговая, продуктовая, научно-техническая, организационная, сбытовая. В нем большую долю составляет интеллектуальный труд.

С другой стороны, это цикл жизни конкретного изделия, изготовленного на предприятии – автомобиля, тепловоза, самолета и т.д., имеющего определенный заводской номер. В этом цикле жизни имеет место движение материальных ресурсов, которые по мере перемещения по производственным подразделениям предприятия претерпевают трансформацию и превращаются из сырья в готовое изделие, которое затем продается, транспортируется, эксплуатируется, физически изнашивается и отправляется в утиль. Здесь преобладает физический труд рабочих или машин, затрачивается большое количество энергии.

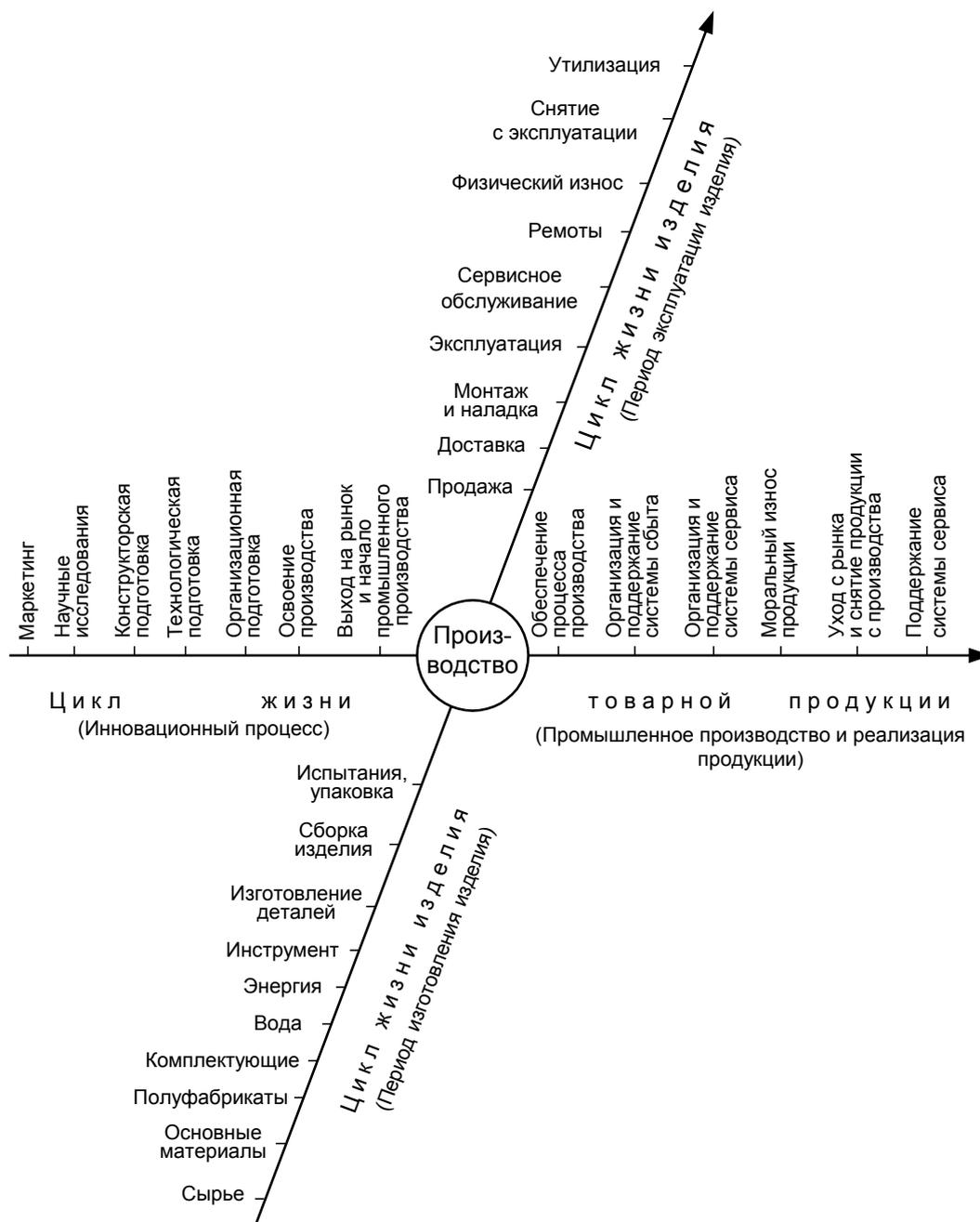


Рисунок 1 – Два цикла жизни продукта

Для цикла жизни товарного продукта характерно принятие стратегических решений, а для цикла жизни конкретного изделия – тактические решения, исполнительская дисциплина и соблюдение требований технологической документации.

Цикл жизни товарного продукта состоит из ряда этапов, которые можно разделить на два периода. Это период создания и освоения новой продукции, который определяется как инновационная деятельность. Вторым периодом представляет собой жизненный цикл промышленного производства продукции и ее реализации.

Цикл жизни конкретного изделия тоже состоит из двух сильно отличающихся периодов. Первый период цикла жизни изделия, то есть, его изготовления, важен тем, что в нем создается потребительская ценность изделия, создается его уровень качества. Место его протекания – предприятие-изготовитель. Во втором периоде изделия распределяются по потребителям. Теперь уже эти изделия выполняют определенные функции в процессе эксплуатации. Чем выше потребительская ценность изделия, тем эффективнее может быть период его эксплуатации.

В работе [1] отмечается, что пересечение двух циклов жизни происходит на этапах "производство". При этом в цикле жизни изделия рассматривается собственно производство, связанное с трансформацией материальных ресурсов, а в цикле жизни товарного продукта – организация производства.

Возникает вопрос: каково взаимное влияние этих двух циклов жизни? Анализ показывает, что два цикла жизни продукции не только пересекаются на этапах производства, но и тесно связаны между собой. Эти два цикла можно было бы назвать сиамскими близнецами, но рождаются они не одновременно и их развитие может происходить с некоторым смещением во времени.

Качество продукции обеспечивается на этапах обоих циклов жизни, но в разной степени. В статье [2] показана экономическая значимость начальных стадий разработки и освоения изделия. На рис. 2 на оси абсцисс представлены три главные фазы освоения изделия: разработка, подготовка производства и производство. Вертикальная ось представляет собой шкалу уровня качества изделия, выраженную в процентах. С таким же успехом на этой оси может быть расположена и шкала себестоимости.

Верхняя кривая иллюстрирует долю ожидаемого уровня качества изделия, которая предопределяется решениями и действиями на каждом этапе освоения товара. Как видим, решениями, принятыми на этапе маркетин-

говых исследований и проектирования, закладывается 75% уровня качества изделия. На оставшиеся два этапа остается только 25%, при этом на подготовку производства приходится 15% и на само производство 10%. Это значит, что на этапе подготовки производства уже невозможно изменить уровень качества изделия более чем на 15%, а на долю производственных подразделений достается только 10% возможностей влияния на уровень качества. Таким образом, все решается на начальном этапе разработки.

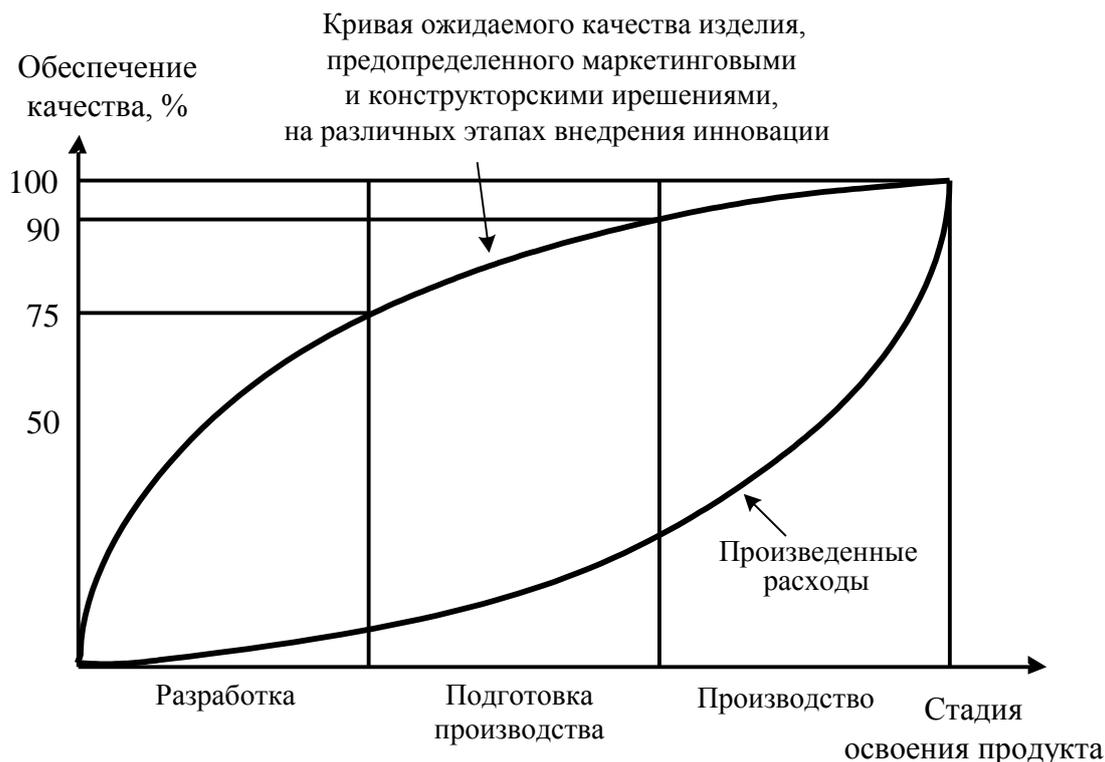


Рисунок 2 – Экономические последствия решений, реализуемых на различных этапах освоения продукции

Разработка изделия и подготовка производства относятся к циклу жизни товарного продукта. Следовательно, именно в этом цикле жизни закладывается уровень качества продукции.

Нижняя кривая иллюстрирует изменение реально произведенных затрат на освоение товара в том же масштабе времени. На начальном этапе разработки, где все и решается, предприятие тратит мало. Это объясняется тем, что хотя и задействуется высококвалифицированный персонал, но он немногочисленный, хотя и используются информационные и моделирующие системы, но еще нет закупок и отсутствуют капиталовложения в обо-

рудование. Зато на стадии производства, где мало возможностей повлиять на уровень качества продукции, производятся основные затраты.

На этапе производства основная часть затрат относится к циклу жизни изделия. Следовательно, мы можем сказать, что уровень качества продукта закладывается решениями, принятыми в цикле жизни товарного продукта, а доля участия в этом процессе решений, принятых в цикле жизни изделия, незначительная. Незначительная в том смысле, что в процессе изготовления изделия не допускается отклонение от технологической документации, разработанной в цикле жизни товарного продукта, даже если это делается с благими намерениями повышения качества. Свой вклад в качество продукции производство вносит, изготавливая изделия строго по технологической документации. Если производственные подразделения имеют определенные идеи по улучшению технологии, то они могут их реализовать только по согласованию с отделом главного технолога. Но реальное качество изделий целиком и полностью зависит от производственных подразделений, от их способности обеспечить изготовление продукции в строгом соответствии с требованиями документации. Каждое отклонение от требований технологического процесса, качества основных материалов и комплектующих приводит к снижению уровня качества продукции или к повышению себестоимости продукции.

Но даже изделия, изготовленные в строгом соответствии с требованиями технической документации, могут оказаться не конкурентоспособными на рынке, уступая по уровню качества изделиям других производителей. В этом случае производство оказывается бессильным помочь своей организации. Здесь должен вступать в действие цикл жизни товарного продукта – маркетинг, НИОКР, технологическая подготовка производства.

В цикле жизни товарного продукта на этапе конструкторской подготовки принимается и решение «сделать или купить», которое коренным образом влияет на период изготовления в цикле жизни изделия. Если будет принято решение о производстве всех составляющих на предприятии, то производство станет многопрофильным, с использованием множества технологий. Вся ответственность за качество продукции ложится на само предприятие. Второй крайний вариант – это сборка с готовых элементов, полученных от других производителей. Предприятие занимается только сборкой, осваивает так называемую «отверточную технологию». Здесь качество изделия зависит в большой степени от поставщиков комплектующих, но потребители все равно связывают качество продукции с предприятием, выпускающим конечную продукцию. И только если поставщик

комплектующего изделия указывает свою марку и оно значимое для данного продукта, например двигатель в автомобиле, то поставщик берет на себя ответственность за двигатель, а значит, разделяет и ответственность за автомобиль.

Имеется и другая взаимосвязь работ, производимых на различных этапах этих циклов, что способствует повышению качества изделий. Возьмем, к примеру, взаимосвязь отделов маркетинга и сбыта. Известно выражение П. Друкера «Цель маркетинга – сделать усилия по сбыту ненужными». То есть, функция маркетинга, относящаяся к циклу жизни товарного продукта, заставляет предприятие выводить на рынок товар, ожидаемый покупателями, и готовит рынок к приему новой продукции потребителями, помогая, таким образом, функции сбыта из цикла жизни изделия. К циклу жизни товарного продукта можно отнести функции маркетинга, обеспечивающие поиск поставщиков и потребителей продукции и заключение с ними долгосрочных программ поставок материалов, полуфабрикатов, комплектующих и инвестиционных товаров, а также закупок продукции предприятия. Но эти предварительные соглашения носят еще виртуальный характер, они становятся реальными только при оплате счетов – данным предприятием поставщикам, а предприятию – заказчиками. Обеспечение операций по конкретной закупке и продаже с оплатой счетов относится к жизненному циклу изделия. Реализует эти операции функция закупки материально-технических ресурсов и функция сбыта, примыкающие к циклу жизни изделия. При принятии важных решений по закупкам в этом процессе могут принимать участие и представители отдела сбыта, поскольку качество материалов и комплектующих влияет на качество конечной продукции и её конкурентоспособность, а значит и на её сбыт. В процессе закупок принимают активное участие представители различных функциональных отделов предприятия. Так представители службы НИОКР разрабатывают для отдела материально-технического снабжения спецификации на материалы. При закупках сложного оборудования выбор производят технические службы – отдел главного технолога, отдел главного механика, отдел главного сварщика и т.д., а окончательное решение принимает технический директор.

Имеет место обратная связь от отдела сбыта и службы сервиса, которые работают непосредственно с покупателями, к подразделениям НИОКР. В результате этой взаимосвязи обобщенные требования рынка поступают в конструкторское бюро, где производится разработка новых модификаций изделий или модернизация существующих. Так, на взаимо-

действии цикла жизни изделия и цикла жизни товарного продукта отслеживается и удовлетворяется требуемый на рынке уровень качества продукции.

Тесная зависимость существует между этапом технологической подготовки производства из цикла жизни продукции и движением материальных ресурсов и их трансформацией в готовое изделие, то есть изготовлением на предприятии. Характер процесса изготовления полностью определяется технологической подготовкой производства. Но существует и обратная связь – при разработке совокупности мероприятий, обеспечивающих технологическую готовность производства, обязательно учитывают сложившийся на предприятии технологический потенциал и разрабатываются мероприятия по его совершенствованию с целью совершенствования технологических процессов и возможности повышения уровня качества производимой продукции.

Организация и поддержание системы сервиса в цикле жизни товарного продукта вызвано тем, что в настоящее время предложение предприятия состоит из материальной составляющей и сопутствующих услуг, что повышает качество предложения в целом и обеспечение конкурентоспособность происходит в основном за счет расширения сервисных услуг. Реализация сервисных услуг осуществляется, главным образом, у потребителя в процессе эксплуатации изделий. Это гарантийное и послегарантийное обслуживание, ремонты, что относится к циклу жизни изделия. Такое взаимодействие циклов жизни изделия позволяет эффективнее использовать потенциал изделия, дольше сохранить его характеристики качества.

Большое значение имеет взаимосвязь этапов разработки изделия и этапа эксплуатации. Если цикл жизни товарного продукта осуществляется одним предприятием, а если какие-то этапы и выполняются на стороне, то по заказу данного предприятия, то цикл жизни конкретного изделия делится на два периода, которые реализуются на разных предприятиях или в разных организациях – период изготовления протекает на заводе – изготовителе, а период эксплуатации – у покупателя изделия. Если предприятия-производители не разрабатывают и не выпускают широкую гамму модификаций изделий, что им экономически выгодно, то они закладывают повышенные расходы у потребителей их продукции. В этом случае часть потребителей вынуждены использовать устройства меньшей производительности, или меньшей мощности, или меньшей скорости по сравнению с потребными, а другие, наоборот, используют устройства с характери-

ками, превышающими их потребности. И то, и другое ведет к неэффективному использованию изделий. Поскольку качество продукта, это его способность удовлетворять потребности и ожидания конкретного потребителя, то для одних потребителей изделия будут качественными, а для других некачественными. Увеличение количества модификаций более полно удовлетворяет потребности всех потенциальных потребителей, изделия становятся для них качественными, а эксплуатация экономически более эффективной.

Перекликаются также этапы снятия продукции с производства и утилизации изделий. Однако связи между ними практически нет, это совсем разные вещи. Снятие продукции с производства является следствием ее морального устаревания и относится к жизненному циклу продукции, а утилизация – следствие физического износа и относится она к циклу жизни конкретного изделия. Взаимосвязь появится в том случае, если в жизненном цикле продукции службой сервиса будет разработана система утилизации изделий. Но такая система утилизации предприятиями разрабатывается редко, например, при утилизации радиоактивно зараженного оборудования, сборе фотопленок для извлечения серебра и т.д. В большинстве случаев утилизацией занимаются другие структуры.

**Список литературы:** 1. *Крыжний Г.К.* Качество и два цикла жизни продукции // Високі технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. Харків, НТУ «ХПІ», 2010. – Вип. 1 (20). – С.107-117. 2. *Крыжний Г.К., Федорович В.А., Вerezуб Н.В., Козакова Н.В.*, Пути обеспечения качества на этапе разработки продукта // Сучасні технології в машинобудуванні: Сбірник наукових праць/Под ред. В.О.Федоровича.-Харьков: НТУ «ХПІ», 2009.-С.225-230 3. *Организація виробництва: Навч. посіб. / В.О. Оніщенко, О.В. Редкін, А.С. Старовірець, В.Я. Чевганова.* – К.: Лібра, 2005. – 336 с. 4. ГОСТ 15.000-82. Система разработки и постановки продукции на производство. Общие положения. – Введ. 01.09.85. – М.: Изд-во стандартов. 1982. – 50 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. *Kryzhnyj G.K.* Kachestvo i dva cikla zhizni produkciï // Visoki tehnologii v mashinobuduvanni: zb. nauk. prac'. Harkiv, NTU «HPI», 2010. – Vip. 1 (20). – S.107-117. 2. *Kryzhnyj G.K., Fedorovich V.A., Verezub N.V., Kozakova N.V.*, Puti obespechenija kachestva na jetape razrabotki produkta // Suchasni tehnologii v mashinobuduvanni: Sbirnik naukovih prac'/Pod red. V.O.Fedorovicha.-Har'kov: NTU «HPI», 2009.-С.225-230 3. *Organizacija virobniictva: Navch. posib. / V.O. Oniwenko, O.V. Redkin, A.S. Starovirec', V.Ja. Chevganova.* – K.: Libra, 2005. – 336 s. 4. GOST 15.000-82. Sistema razrabotki i postanovki produkciï na proizvodstvo. Obwie polozhenija. – Vved. 01.09.85. – M.: Izd-vo standartov. 1982. – 50 s.

**В.Я. ЛЕБЕДЕВ**, канд. техн. наук, Минск, Беларусь

## **ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА И БЕЗОПАСНОСТИ ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ РЕЗАНИЕМ**

У статті обговорюються проблеми забезпечення експлуатаційної безпеки інструмента й ефект сертифікації на цих факторах роботи. Аналіз зроблений з досвіду, отриманого протягом роботи тестового центру в області сертифікації інструмента, так само описані сучасні тестові засоби обслуговування.

В статье обсуждаются проблемы обеспечения эксплуатационной безопасности инструмента и эффект сертификации на этих факторах работы. Анализ сделан из опыта, полученного в течение работы испытательного центра в области сертификации инструмента, так же описаны современные испытательные средства обслуживания.

*V.JA. LEBEDEV*

### *MAINTENANCE OF QUALITY AND SAFETY OF THE TOOL FOR MACHINING BY CUTTING*

The paper discusses the problems of cutting tool operational safety and effect of certification on these performance factors. The analysis is made of the experience gained during work of the test center in the field of tool certification as well as test facilities developed are described.

*Введение.* Современные технологии в металлообработке реализуются на оборудовании с высокими скоростями резания. Такое оборудование должно иметь высокую технологическую и динамическую устойчивость и потому для его эффективной эксплуатации актуальным является качественное инструментальное обеспечение. Абразивные и алмазные шлифовальные инструменты работают на скоростях 30-100 м/с и более. Современные лезвийные инструменты на основе сверхтвердых материалов (минералокерамики, алмаза, кубического нитрида бора, нитрида титана и др.) также эксплуатируются со скоростями резания свыше 10 м/с. К ним предъявляются высокие требования как по режущей способности, так по механической прочности и безопасности. Это минимальный комплекс требований к режущему инструменту. В машиностроении и металлообработке вопросы качества особенно актуальны, так как эти отрасли выпускают продукцию, с которой человек непосредственно сталкивается ежедневно.

Однако в последние десятилетия на территории СНГ практически не производится испытательное оборудование, а имеющиеся стенды серии СИП устарели как физически, так и морально. Также не все страны привели стандарты в области безопасности к европейским и мировым нормам. Так российские ГОСТ Р 52588-2006 и ГОСТ Р 53001-2008 гармонизированы с европейскими стандартами, а в Беларуси, например, действуют пока советские ГОСТ 12.3.023 и ГОСТ 12.3.028 с более низкими нормами безопасности абразивного, алмазного и эльборового инструмента.

*Испытания и сертификация режущих инструментов.* Физико-технический институт НАН Беларуси имеет богатый опыт разработок в области создания и обработки материалов. При выполнении заданий государственных научно-технических программ пришли к пониманию того, что современные условия международного рынка диктуют законы, которые необходимо соблюдать для поддержания конкурентоспособности научной и технической продукции. В концепции ряда программ уже были заложены требования по сертификации. В рамках выполнения проектов научно-технической программы «Алмазы и сверхтвердые материалы» были разработаны нормативная и методологическая базы, необходимое испытательное оборудование. В 1998 г. испытательный центр ФТИ был оформлен организационно, а в феврале 2000 г. прошел процедуру аккредитации в Национальной Системе получив аттестат аккредитации ВУ/112.02.1.0368. В настоящее время центр входит в перечень аккредитованных испытательных лабораторий Таможенного союза Беларуси, Казахстана и России. В область аккредитации центра вошла значительная часть алмазной продукции инструментального назначения (алмазные шлифовальные круги, бруски хонинговальные, правящий инструмент и др.), а также фрезы, резцы токарные, абразивные круги и другие инструменты. Сертификационные испытания проводятся как по стандартным методикам, так и по разработанным в центре и аттестованным в системе Госстандарта РБ. Виды испытаний включают требования безопасности, механической прочности, показатели эксплуатационных свойств, состояния рабочих поверхностей, точность геометрических размеров и формы и др.

Требования безопасности к алмазным кругам регламентируются ГОСТ 12.3.023-80, а также техническими условиями по ГОСТ 16181-82, ГОСТ 30352-96, ГОСТ 10110-87, ГОСТ 16115-88 и др. К абразивным и эльборовым шлифовальным кругам (ГОСТ 2424-83 и ГОСТ 17123-79) и отрезным кругам по ГОСТ 21963-2002 требования безопасности регла-

ментируются ГОСТ 12.3.028-82. Методы испытаний абразивного и алмазного инструмента дополняет ГОСТ 30513-97. Требования к испытательному оборудованию устанавливает ГОСТ 24555-81. Требования работоспособности лезвийного инструмента (резцов токарных) устанавливают технические условия по ГОСТ 5688-61, ГОСТ 26613-85 и другие, а требования безопасности - СТБ ГОСТ Р 51140-00.

Для реализации процессов испытания и с учетом указанных требований в лаборатории физики поверхностных явлений ФТИ НАН Беларуси разработан ряд испытательных стендов, которые эксплуатируются в испытательном центре ФТИ и на ряде предприятий РБ. Например, разработана серия ФТИ 9. 000 стендов испытательных. Предназначены такие стенды для испытания на механическую прочность и запас прочности абразивных кругов. Также могут применяться при испытаниях алмазных кругов на механическую прочность соединения корпуса круга с алмазным слоем и на механическую прочность корпуса круга.

Основные технические характеристики стенда ФТИ 9.140:

Количество испытательных камер - 2

Диаметр испытываемых кругов, мм 63-600

Высота кругов, мм 1-80

Масса испытываемых кругов максимальная, кг 30

Мощность приводов, кВт

большой камеры 3-4,5

малой камеры 0,37-0,55

Количество предустановленных ступеней испытаний – до 15.

Питание от сети переменного тока напряжением 380В частотой 50Гц.

Привод по испытательным камерам - отдельный с управлением от одного пульта. Регулировка режима испытаний производится настройкой инверторного привода на соответствующие частоты.

На стенде без предварительной балансировки могут испытываются круги классов точности AA и A и классов неуравновешенности 1 и 2 в большой камере массой до 10 кг, в малой камере массой до 0,7 кг. Круги других классов точности и массой выше указанных должны быть предварительно статически отбалансированы на оправках перед испытанием на стенде.

Общий вид стенда приведен на рисунке 1а. Стенд состоит из основания, с которым совместно выполнен корпус большой испытательной камеры. К задней стенке большой камеры крепится фланец, в котором монтируется рабочий шпиндель. Фиксация шпинделя во фланце осуществляется

посредством стягивающих втулок со скошенными торцами, проходящих через корпус фланца в касательном направлении. На заднем конусе шпинделя установлен шкив, который передает вращение от электродвигателя посредством поликлиновой передачи. На переднем конусе шпинделя смонтирована оправка, на которую непосредственно устанавливаются испытываемые круги с посадочным диаметром 76 и 127 мм, а также переходные фланцы для установки кругов с посадочными диаметрами 203 и 305 мм. Большая камера закрывается крышкой, установленной на петлях и фиксируемой в закрытом положении самоконтрящейся рукояткой. Закрытое положение крышки контролируется конечным выключателем.

Электродвигатель привода большой камеры установлен с возможностью поворота на подмоторной плите для натяжения ремня передачи. К основанию и задней стенке большой камеры приварена площадка для крепления подмоторной плиты с электродвигателем, шпинделя и корпуса малой камеры. На переднем конусе указанного шпинделя устанавливаются оправки для закрепления испытываемых отрезных и зачистных кругов диаметром 125-300 мм и шлифовальных кругов диаметром до 200 мм. Допускаемое биение посадочных поверхностей смонтированных оправок не более 0,03 мм. Камера закрывается крышкой, фиксируемой рукояткой с самоконтрящимся кулачком. На корпусе малой камеры также установлен конечный выключатель, обеспечивающий блокировку включения привода при открытой дверце камеры.



*a*



*б*

Рисунок – Общие виды стендов ФТИ 9.140 – *a*, ФТИ 9.052  
(для испытания кругов диаметром до 1200 мм) - *б*

К стенду прилагается комплект оправок, предназначенных для испытания кругов с посадочными диаметрами от 22 до 305 мм. Между фланцами оправок и кругом обязательно должны быть установлены прокладки из

картона по ГОСТ 9347-74 или другого эластичного материала толщиной 0,5-1 мм. Прокладки должны перекрывать всю прижимную поверхность фланцев и равномерно выступать наружу по всей окружности не менее чем на 1 мм. При установке на испытательный стенд шлифовальные круги должны центрироваться.

Первичная и периодическая аттестация стенда производится по методике аттестации МА-МН 143-2000, разработанной с учетом требований ГОСТ 24555-81 и прошедшей метрологическую экспертизу Госстандарта РБ.

Опыт разработки и эксплуатации испытательных стендов показал их высокую надежность. Учитывая, что номенклатура испытательных стендов серии СИП узкая, а их исполнение отличается высокой материалоемкостью, конкурентоспособность разработанных стендов не вызывает сомнения. В приводах стендов используется современная элементная база, инверторное управление частотой вращения двигателей с возможностью предварительного программирования до 15 режимов испытаний (зависит от комплектации инвертора). Выносной блок управления стендом располагается вне помещения, где устанавливается стенд. В конструкции стенда применяются унифицированные шпиндельные узлы, отличающиеся высокой ремонтпригодностью. По техническим требованиям заказчика могут поставляться одно и двухкамерные стенды, напольного и настольного исполнения в зависимости от типоразмеров испытываемых кругов.

*Влияние сертификации на качество продукции.* Следует отметить наш некоторый опыт в области обеспечения безопасности и качества режущего инструмента. Сертификацию следует рассматривать не как, собственно, процесс проведения сертификационных испытаний и выдачи сертификата соответствия, а как совокупность технических и организационных мероприятий, предпринятых производителем на пути к этому. Можно констатировать, что сертификация вносит существенный, а в ряде случаев решающий вклад в повышение качества продукции. При современной глобализации человеческой деятельности сертификация является одним из важнейших инструментов в повышении конкурентоспособности производителей на мировом рынке через повышение качества продукции. Существует объективная потребность в сертификации систем качества для реализации продукта и на внутреннем рынке. Насыщение внутреннего рынка импортным продуктом обостряет конкурентную борьбу отечественных предприятий с зарубежными поставщиками и приводит их к целесообразности иметь у себя действующую систему качества, отвечающую требова-

ниям международных стандартов. По идеологии норм ИСО система качества должна быть взаимоувязана со всеми видами деятельности производителей, и она приносит прибыль за счет максимального сокращения расходов, связанных с доработками, переделками и повторными испытаниями. Эффект достигается как раз на пути к ее внедрению.

История борьбы за качество такая же древняя, как производство товаров и оказание услуг. Известные кодекс Хаммурапи и указы Петра Первого (казнивших недобросовестных производителей) являются показательными в такой борьбе. В современной истории одним из первых шагов в улучшении качества стало внедрение в начале 20 столетия статистических методов контроля. Затем последовали крупные инвестиции в обеспечение качества на стадиях планирования, анализа, разработки и производства изделий. Опыт показал, что устранение дефектов на стадии разработки на порядок дешевле, чем, если они будут обнаружены в процессе производства. Так пришли к нынешней системе «всеобъемлющего менеджмента качества», предусматривающей постоянный анализ производственных ситуаций, устранение слабых мест и улучшение технологий. Это относится к производству товаров и услуг.

Таким образом, критерий «качество» следует рассматривать как «совокупность признаков продукции относительно их пригодности выполнять установленные и обусловленные требования». Тогда уровень качества продукции можно характеризовать как соответствие требованиям. Исторический опыт показал, что основой достижения качества является предупреждение негативных явлений. Оценивать масштаб качества принято по затратам, связанным с невыполнением соответствующих требований и устранением последствий.

Опыт работы нашего центра показал, что производители, заинтересованные в повышении качества продукции и продвижении ее на рынке уделяют большое внимание модернизации производства и совершенствованию технологии. Весьма активно участвуют они в процессах сертификации своей продукции, так и систем менеджмента качества предприятия. Например, за 2004-2007 гг. Гомельский завод специального инструмента и технологической оснастки провел сертификацию широкой гаммы токарных резцов и фрез и в значительной мере обеспечив этим рост поставок на внутренний рынок и ежегодный прирост экспорта. Заметное улучшение качества продукции обеспечило доверие потребителей и их нацеленность на долговременное сотрудничество. И в настоящее время предприятие ак-

тивно проводит мероприятия по поддержанию качества продукции, расширяя перечень сертифицированной продукции и поддерживая выданные сертификаты соответствия. Гомельское ПО «Кристалл» за последние годы также добилось значительного прироста экспортных поставок. В том числе, эффект достигнут и благодаря проведению сертификации алмазной продукции. Большая часть потребителей алмазного инструмента в РБ предпочитают инструмент ПО «Кристалл» за его высокое и стабильное качество и надежность поставщика. Не отстают от крупного производителя алмазного инструмента государственной формы собственности и продвинутые частные фирмы (ООО «Диавэй», ОДО «МКД-Технологии» и др.). Их приход и прохождение процедур добровольной сертификации продукции показывает не только высокий уровень производства и надежность технологии, но указывает на серьезность производителя в вопросах качества и безопасности его продукции. Поддерживая стратегию качественного развития, такие предприятия уверенно чувствуют себя не только на рынке РБ, но и за рубежом.

Имеется и обратный опыт. К нам неоднократно обращались как фирмы-импортеры, так и отдельные производители из Беларуси и России с целью получения сертификата соответствия (чаще называя это сертификатом качества) на круги алмазные, круги отрезные, сверла по металлу и по бетону и другие виды инструментов. Но ознакомившись с требованиями испытательного центра и Органа по сертификации продукции, такие заявители, почему то, исчезали с поля зрения. Это свидетельствует, что работы в области качества режущего инструмента и гарантированного обеспечения его безопасности еще недостаточно. Необходимо, в том числе и на законодательном уровне, внедрение обязательной сертификации или обязательного декларирования инструментов. Особенно это актуально для алмазных и абразивных как шлифовальных, так и отрезных кругов.

#### *Заключение*

1. Соблюдение требований безопасности режущих инструментов является актуальной проблемой. Опыт показывает, что сертификация является важным аргументом в обеспечении безопасности и качества продукции, в конкурентной стратегии развития производителей.

2. Важно принятие согласованных решений указанных вопросов в рамках таможенного союза и СНГ.

**Е.К. ПОСВЯТЕНКО**, д-р техн. наук,  
**Н.І. ПОСВЯТЕНКО**, канд. техн. наук, Київ, Україна

## **ДО СТАНОВЛЕННЯ ІНЖЕНЕРІЇ ПОВЕРХНІ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ЯК ПРІОРИТЕТНОГО НАПРЯМКУ МАШИНОБУДУВАННЯ**

Проаналізовано в історичному аспекті розвиток основних складових методів інженерії поверхні: техніки, технології, інструменту, матеріалів. Розкрито механізм дії фізико-механічних та геометричних характеристик поверхні на службові властивості деталей машин.

Проанализировано в историческом аспекте развитие основных составляющих методов инженерии поверхностей: техники, технологии, инструмента, материалов. Раскрыт механизм действия физико-механических и геометрических характеристик поверхности на служебные свойства деталей машин.

*E.K. POSVJATENKO, N.I. POSVJATENKO  
TO BECOMING ENGINEERING OF A MACHINES DETAILS SURFACE AS PRIORITY  
DIRECTION OF MECHANICAL ENGINEERING*

Development of basic making methods of surfaces engineering is analysed in a historical aspect: technique, technology, instruments, materials. The mechanism of action of physico-mechanical and geometrical descriptions of surface is exposed on official properties of the details machines.

Як відзначається у роботі [1] у сучасному машинобудуванні в останні десятиліття склався пріоритетний напрямок – поверхневе зміцнення і нанесення зміцнюючих захисних покриттів, який отримав загальну назву «інженерія поверхні» (surface engeniring). Починаючи з 90-х років минулого століття Північна Америка, Японія і Західна Європа вкладають в цей напрямок щорічно порядку 50–100 млрд. дол. США. Застосування поверхневих зміцнюючих технологій дозволяє підвищити довговічність деталей машин у 2–100 раз. При цьому знижуються витрати палива і забезпечується можливість інтенсифікації багатьох виробничих процесів.

Згідно з уявленнями авторів фундаментальної праці [2], що узагальнює їх дослідження останніх десятиліть в галузі інженерії поверхні деталей машин (ІП), методи обробки або створення поверхневих шарів останніх поділяються за способом виконання на механічні, термомеханічні, термічні, хіміко-термічні, електрохімічні та хімічні, фізичні. В межах цієї класи-

фікації основними методами, що знайшли на сьогодні широке застосування, є: газотермічне напилення, вакуумне осадження, наплавлення, модифікування поверхні концентрованими потоками енергії, електроіскрове легування, деформаційне зміцнення, гальванічні процеси, хімічне осадження та дифузійне насичення.

У наших публікаціях [3, 7–9] також показано, що кількості відомих на сьогодні методів ІІІ деталей машин доцільно розділити на чотири класи: нанесення покриттів, модифікування поверхневого шару, технологічне забезпечення фізико-механічних властивостей і топографії поверхні та комбіновані («гібридні») методи. Дослідження показали, що набуття потрібних службових характеристик поверхнею деталі (зносостійкості, теплостійкості, корозійної стійкості, опору окисленню, втомної міцності, контактної жорсткості, опору адгезії, антифрикційних або фрикційних властивостей, герметичності з'єднань, ущільнення пар тертя, утримання мастила, а також декоративно-художніх, екологічних, електроізоляційних, теплоізоляційних, різальних та інших корисних властивостей) відбувається через низку геометричних та фізико-механічних характеристик поверхні. До останніх, зокрема, належать точність, шорсткість, твердість, мікротвердість, опорна площа, пористість, залишкові напруження, мікроструктура, мікрорельєф, макрорельєф, адгезія, текстура, міцність зчеплення з основою тощо.

Слід відзначити що, хоча вказаної систематизації, бурхливого розвитку і застосування у промисловості методи ІІІ набули лише в кінці минулого століття, ключові технічні та технологічні засади цього потужного науково-технічного напрямку були створені раніше, головним чином, починаючи з ІХ–ХІ століття н.е., особливо з другої половини ХVІІІ – до середини ХХ століття. Розглянемо деякі з них.

На зламі цих століть (1794–1800 рр.) Генрі Модслі завершив побудову токарно-гвинторізного верстату з механічним супортом, за допомогою якого пов'язувався головний рух з двокоординатною подачею інструмента. Це технічне рішення розмежувало періоди ручної та машинної праці і стало основою для створення інших металорізальних верстатів і машин для нанесення покриттів.

У 1802 р. професор фізики із Санкт-Петербурга Василь Петров відкрив дуговий розряд, чим фактично започаткував еру електричного зварювання, відзначивши у своїх публікаціях у 1803 р., що дуговий розряд плавить метал. У 1882 р. М.М. Бенардосу вдалося вирішити майже усі технічні проблеми дугового зварювання. Таким чином, В.В. Петров, М.М. Бенардос та М.Г. Слав'янов, який уперше застосував плавкий елект-

род, створили науково-технічне підґрунтя електродугового зварювання плавленням, що пізніше стало основою нанесення покриттів наплавленням та напиленням електродуговою металізацією і за допомогою плазмових технологій.

У період з 50-х років XVIII ст. по 70-ті роки XIX ст. було уперше отримано у вільному стані ряд хімічних елементів, які пізніше стали використовуватись у різних методах ІІ як легуючі, розкислюючі, карбідоутворюючі тощо. Це: нікель, марганець, молібден, вольфрам, магній, кальцій барій, цирконій, алюміній, титан, берилій, ванадій.

У 1868 р. Д.К. Чернов відкрив фазові перетворення у сталі при її нагріванні і критичні точки (температури) поліморфних перетворень, що визначають структуру і властивості сталі, як основи металознавства, термічної та хіміко-термічної обробки.

У 1834–1837 рр. Б.С. Якобі уперше застосував у промисловості електрику як рушійну силу, сконструювавши перший двигун постійного струму, і розробив основи гальванопластики. Ці технічні рішення, а також винаходи І.Ф. Усагіна (трансформатор змінного струму, 1870 р.), М. Тесли (система двофазного струму: генератор, трансформатор, двигун, 1885 р.) і М.О. Доліво-Добровольського (трифазний генератор і трифазний трансформатор, 1888–1889 рр.) стали основою джерел живлення при електрозварюванні і напиленні, а також технологій отримання гальванічних покриттів.

У 1898–1900 рр. Ф. Тейлор та Уайт (США) винайшли склад та спосіб термічної обробки швидкорізальної сталі з оптимальним вмістом легуючих елементів: вольфрам – 18%; хром – 5,5%; ванадій – 0,3% при вмісті вуглецю 0,67%. Червоностійкість цієї сталі перевищує 500 °С, що робить її унікальним матеріалом для теплостійких покриттів та інструментів.

У 1836 р. було вперше отримано ацетилен, спалювання якого у кисні утворює полум'я з температурою 3150 °С, досягти якої при використанні інших горючих не вдається. Тому на сьогодні цей газ разом з киснем широко застосовується в методах ІІ. У 1900–1905 рр. Муассан (Франція) та Вільсон (США) запропонували простий і ефективний спосіб отримання сировини для виробництва ацетилену – карбід кальцію з вапняку, що є основним і тепер.

В таблиці подано періодизацію окремих важливих технічних рішень та винаходів, що стали основою способів ІІ деталей машин. Таблицю складено на основі публікацій [1–9].

Таблиця – Окремі важливі технічні рішення та винаходи

№ п/п	Нове технічне або технологічне рішення в галузі ІП, установка, інструмент, матеріал для реалізації способів ІП	Дата оприлюднення або початок застосування	Автор, держава
1	2	3	4
1.	Цементация поверхневого шару виробів з кричної сталі у твердому карбюризаторі	ІХ–Х ст. н.е.	Ремісничі цехи у містах Київської Русі
2.	Виготовлення порошків шляхом розпоршення рідкого металу стиснутим повітрям за допомогою міхів	Х–ХІ ст.н.е.	Ремісничі цехи у містах Київської Русі
3.	Зміцнення маловуглецевої сталі (криці) наклепом (холодною пластичною деформацією)	Х ст. н.е.	Ремісничі цехи у містах Київської Русі
4.	Синтез високовуглецевої (С 1–1,5 %) сталі з вихідних матеріалів – маловуглецева (крична) сталь і сірий чавун	1727 р.	Реомюр, Франція
5.	Отримання у вільному стані низки хімічних елементів (легуючих, шлакоутворюючих, розкислюючих, карбідо- і нітридоутворюючих тощо): Ni, Mn, Mo, W, Mg, Ca, Ba, Ti, Al, Zr, Be, V	50-ті рр. ХVІІІ ст. – 70-ті рр. ХІХ ст.	Промислово розвинуті держави
6.	Побудова першого токарно-гвинторізного верстату з механічним супортом	1794–1800 рр.	Генрі Модслі, Англія
7.	Відкриття електричної дуги	1802 р.	В.В. Петров, Росія
8.	Розробка основ гальванопластики та двигуна постійного струму	1834–1837 рр.	Б.С. Якобі, Росія
9.	Синтез ацетилену з температурою спалювання в кисні 3150°C	1836 р.	Англія, Франція
10.	Відкриття фазових перетворень у сталі при її нагріванні та критичних точок поліморфних перетворень	1868 р.	Д.К. Чернов, Росія
11.	Винайдення трансформатора змінного струму	1870 р.	І.Ф. Усагін, Росія
12.	Перше застосування дугового розряду для електрозварювання металів: розробка способу зварювання з вугільним неплавким електродом	1882 р.	М.М.Бенардос, Росія
13.	Розробка способу дугового зварювання металевим плавким електродом	1888 р.	М.Г. Славянов, Росія
14.	Розробка трифазного генератора і трифазного трансформатора	1888 –1889 рр.	М.О. Доліво-Добровольський, Росія

	2	3	4
15.	Перше застосування флюсу (подрібненого скла) для захисту зварювальної ванни	1890 р.	М.Г. Славянов, Росія
16.	Винайдення складу та способу термічної обробки швидкорізальної сталі	1898–1900 рр.	Ф. Тейлор, Уайт, США
17.	Зародження газової техніки напилення порошків за допомогою тепла спалюваних горючих газів та транспортування нагрітих порошків стиснутим повітрям	Рубіж XIX–XX ст.	Промислово розвинуті держави
18.	Розробка способу отримання сировини для виробництва ацетилену – карбіду кальцію	1900–1905 рр.	Муассан, Франція; Вільсон, США
19.	Розробка першого апарату для напилення, що поєднував порошковий живильник з пристроєм для нагнітання повітря	1902 р.	С. Терстон, США
20.	Створення першої промислової тигельної установки для напилення порошків	1909 р.	Макс Ульріх Шооп, Швейцарія
21.	Створення першого дводротового електричного апарату для дугової металізації розпиленням	1917 р.	Макс Ульріх Шооп, Швейцарія
22.	Створення металокерамічних твердих сплавів на основі карбіду вольфраму (наповнювач) та кобальту (зв'язка)	1927 р.	Карл Шрьотер, Німеччина
23.	Започаткування використання техніки та технології напилення для відновлення спрацьованих деталей машин	Рубіж 20-х – 30-х рр. XX ст.	Промислово розвинуті держави
24.	Системне застосування джерел змінного струму для наплавки	Початок 30-х рр. XXст.	СРСР
25.	Застосування електротехніки (дуги та струмів високої частоти) як енергетичної бази для процесів газотермічного напилення	Кінець 30-х рр. XX ст.	СРСР, інші промислово розвинуті держави
26.	Перше застосування газотермічного напилення порошків для відновлення та зміцнення деталей машин	1936 р.	Німеччина

Слід відзначити, що у даній роботі охоплено лише окремі технічні та технологічні рішення, що стали основою методів ІІІ. Тому подальше вивчення інших технічних рішень в даному напрямку вимагає окремого дослідження.

**Список використаних джерел: 1.** Харламов Ю.А., Будагьянц Н.А. Физика, химия и механика поверхности твёрдого тела. – Луганськ: вид-во СУДУ, 2000. – 624 с.  
**2.** Інженерія поверхні: Підручник / К.А. Ющенко, Ю.С. Борисов, В.Д. Кузнецов, В.М.

Корж. – К.: Наук. думка, 2007. – 559 с. **3.** *Посвятенко Е.К., Посвятенко Н.І.* Становлення техніки та технології методів інженерії поверхні деталей машин на початок ХХ століття // Інженерія поверхності і реновація izdelij: Матер. 11-й междунар. науч.-техн. конф., 23-27 мая 2011 г., г. Ялта. – К.: АТМ України, 2011. – С.167–168. **4.** Теорія і практика нанесення захисних покриттів / *П.А. Витязь, В.С. Ивашко, А.Ф. Ільющенко і др.* – Мн.: Беларуская навука, 1998. – 583 с. **5.** *Полонський Л.Г.* Техніка напилення газотермічних покриттів (машинна стадія розвитку, XVI–XX ст). – Житомир: ЖДТУ, 2004. – 266 с. **6.** *Тверитникова О.Є.* Зародження і розвиток науково-технічної школи електротехніки професора П.П. Копняєва (1885–1950 рр.): Монографія. – Х.: НТУ «ХПІ», 2010. – 212 с. **7.** *Посвятенко Э.К.* Гибридные процессы инженерии поверхности деталей машин // Інженерія поверхності і реновація izdelij: Матеріали 8-й междунар. науч.-техн. конф., 27–29 мая 2008 г., г.Ялта. – К.: АТМ України, 2008. – С.195–198. **8.** Посвятенко Н.І. Формування взаємовпливу складових технологічної системи в обробці матеріалів різанням у XVIII–XXI сторіччях // Вестник Национального технического университета "ХПИ". – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2008. – № 34. – С. 78–91. **9.** Посвятенко Е.К., Посвятенко Н.І. Роль технологічної системи в основному та ремонтному виробництві деталей транспортних засобів // Вісник Національного транспортного університету: В 2-х частинах. – К.: НТУ, 2008. – Вип.17. – Ч.1. – С.22–29.

**Bibliography (transliterated):** 1. Harlamov Ju.A., Budag'janc N.A. Fizika, himija i mehanika poverhnosti tvjordogo tela. – Lugans'k: vid-vo SUDU, 2000. – 624 s. 2. Inzhenerija poverhni: Pidruchnik / K.A. Juwenko, Ju.S. Borisov, V.D. Kuznecov, V.M. Korzh. – K.: Nauk. dumka, 2007. – 559 s. 3. Posvjatenko E.K., Posvjatenko N.I. Stanovlen-nja tehniki ta tehnologii metodiv inzhenerii poverhni detalej mashin na pochatok HH stolittja // Inzhenerija poverhnosti i renovacija izdelij: Mater. 11-j mezhdunar. nauch.-tehne. konf., 23-27 maja 2011 g., g. Jalta. – K.: ATM Ukrainy, 2011. – S.167–168. 4. Teo-rija i praktika nanesenija zawitnyh pokrytij / P.A. Vitjaz', V.S. Ivashko, A.F. Il'ju-wenko i dr. – Mn.: Belaruskaja navuka, 1998. – 583 s. 5. Polons'kij L.G. Tehnika napi-lennja gazotermichnih pokrittiv (mashinna stadija roz-vitku, XVI–XX st). – Zhitomir: ZhDTU, 2004. – 266 s. 6. Tveritnikova O.Є. Zarodzhennja i rozvitok naukovo-tehnichnoї shkoli elektrotehniki profesora P.P. Kopnjaeva (1885–1950 rr.): Monografija. – H.: NTU «HPI», 2010. – 212 s. 7. Posvjatenko Je.K. Gibridnye processy inzhenerii po-verhnosti detalej mashin // Inzhenerija poverhnosti i renovacija izdelij: Materialy 8-j mezhdunar. nauch.-tehn. konf., 27–29 maja 2008 g., g.Jalta. – K.: ATM Ukrainy, 2008. – S.195–198. 8. Posvjatenko N.I. Formuvannja vzaemovplivu skladovih tehnologichnoї sis-temi v obrobcі materialiv rizannjam u XVIII–XXI storichchjah // Vestnik Nacional'nogo tehni-cheskogo universiteta "HPI". – Har'kov: NTU "HPI". – 2008. – № 34. – S. 78–91. 9. Posvja-tenko E.K., Posvjatenko N.I. Rol' tehnologichnoї sistemi v osnovnomu ta re-montnomu virobnictvi detalej transportnih zasobiv // Visnik Nacional'nogo trans-portnogo universitetu: V 2-h chastinah. – K.: NTU, 2008. – Vip.17. – Ch.1. – S.22–29.

**В.М. ТОНКОНОГИЙ**, д-р техн. наук, **А.А. ПЕРПЕРИ**,  
**Д.А. МОНОВА**, Одесса, Украина

## **МНОГОЦЕЛЕВАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ МЕТОДОМ КОМПЛЕКСНОГО ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА**

Запропонований метод рішення багаточільових завдань оптимізації багатоекстремальних функцій з узагальненими аргументами за допомогою комплексного генетичного алгоритму. Метод випробуваний і рекомендується для використання при проектуванні об'єктів, які мають узагальнені параметри, наприклад, єдину швидкість обертання двох інструментів, розташованих на одному валу. Практичні випробування методу на прикладі комплексної механічної обробки деталей показали його працездатність та технічну ефективність.

Предложен метод решения многоцелевых задач оптимизации многоэкстремальных функций с обобщенными аргументами с помощью комплексного генетического алгоритма. Метод испытан и рекомендуется для использования при проектировании объектов, имеющих обобщенные параметры, например, единую скорость вращения двух инструментов, расположенных на одном валу. Практические испытания метода на примере комплексной механической обработки деталей показали его работоспособность и техническую эффективность.

*V.M. TONKONOGIJ, A.A. PERPERI, D.A. MONOVA*

### *MULTI-PURPOSE OPTIMIZATION BY THE METHOD OF COMPLEX GENETIC ALGORITHM*

The method of the multi-purpose problems decision of multiextreme functions optimization with the generalized arguments by means of complex genetic algorithm is offered. The method is tested and it is recommended for use at designing of the objects having generalized parameters, for example, uniform speed of rotation of two tools, located on one shaft. Practical tests of a method for an example of complex details machining have shown its working capacity and technical efficiency.

Эволюционные методы оптимизации непрерывно развиваются. В частности, появляются новые разновидности классического генетического алгоритма (ГА), позволяющие решать задачи поиска многомерного оптимума быстрее и эффективнее. Немалую роль в этом развитии играют и сами объекты оптимизации, специфика которых требует от ГА новых возможностей. Предлагаем комплексный генетический алгоритм (КГА), предназначенный для использования в задачах многоцелевой оптимизации многоэкстремальных функций с обобщенными аргументами.

Рассмотрим некоторую систему, состоящую из двух подсистем, описываемых многоэкстремальными уравнениями:

$$z_1 = z_1(x_1, y_1); \quad (1)$$

$$z_2 = z_2(x_2, y_2), \quad (2)$$

где  $x_1, y_1, x_2, y_2$  – параметры системы,  $z_1, z_2$  – целевые функции ее функционирования.

Сформулируем проблему решения задачи многоцелевой оптимизации такой системы:

$$P^* = P(z_1^*, z_2^*) = \max P(x_1, y_1, x_2, y_2), \quad (3)$$

где  $P$  – комплексная целевая функция,  $x_{1min} \leq x_1 \leq x_{1max}; x_{2min} \leq x_2 \leq x_{2max}; y_{1min} \leq y_1 \leq y_{1max}; y_{2min} \leq y_2 \leq y_{2max}$ . В данном случае функция  $P$  является, по существу, сверткой компонент многоцелевого показателя качества  $P\{z_1, z_2\}$  и преобразует совокупность таких компонент в скалярный целевой показатель [3].

Если в задаче (3)  $x_1$  и  $x_2$ , а также  $y_1$  и  $y_2$  попарно независимы или, наоборот, равны между собой, то ее решение при известной функции  $P$  оптимально и может быть легко выполнено с помощью ГА.

Проблема возникает в том случае, когда, например,  $x_1$  и  $x_2$  независимы, а  $y_1 = y_2 = y$ . Тогда задача (3) сводится к:

$$P^* = \max P(x_1, x_2, y), \quad (4)$$

а классический ГА становится неприменимым к ней из-за отсутствия символьных моделей такой системы и операторов для их преобразования в ГА.

Особенностью объектов, описываемых выражением (4) является одновременное наличие следующих свойств:

- целевых функций больше одной;
- функции многоэкстремальны;
- часть аргументов у функций обобщены.

Как известно ГА, благодаря своим свойствам, является идеальным инструментом для оптимизации многоэкстремальных функций, в которых дифференцируемость, непрерывность, удовлетворение условию Гельдера (в том числе, липшицируемость функции) не являются необходимым свойством, кроме того, целевая функция может вообще быть не определенной за пределами допустимой области, а в ее пределах иметь несколько глобальных экстремумов [1, 2]. В рамках этого алгоритма объект на генетическом уровне представляется хромосомой, представляющей собой линей-

ную последовательность битовых символов [3, 4]. Наличие в фенотипе объекта нескольких целевых функций приводит на уровне генотипа к появлению “параллельных” хромосом. Однако для целевых функций с обобщенными аргументами такие хромосомы не годятся.

Целью настоящей работы является повышение эффективности оптимизации обобщенных систем путем разработки метода комплексного генетического алгоритма, оперирующего на уровне генотипа звездообразными хромосомами.

КГА, так же, как и классический ГА, начинается с ввода исходных данных. Здесь отличие от ГА заключается в том, целевых функций больше, чем одна, и все они должны быть известны (например, в результате эксперимента) к началу работы КГА.

Далее начинается подготовительный период. Отличие его от ГА в двух компонентах:

- вначале рассчитываются целевые функции для всей популяции, а затем их значения объединяются в значение функции приспособленности  $P$ ;
- в новом методе символьными моделями объекта являются особые, комплексные звездообразные хромосомы.

Всего звездообразных хромосом, изображенных на рис. 1 в, формируется  $N$  – по количеству особей-родителей нулевого поколения.

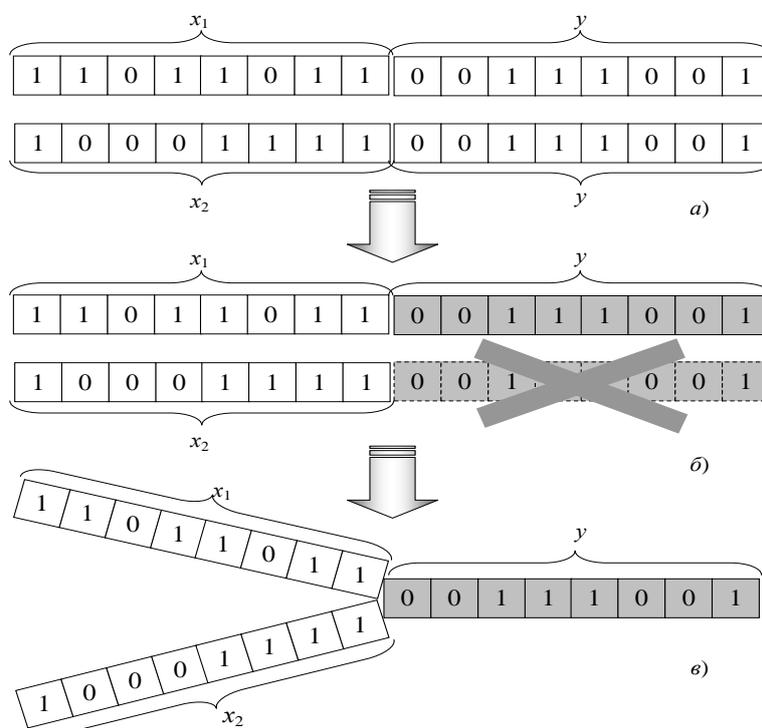


Рисунок 1 – Схема формирования звездообразной хромосомы с обобщенным параметром: *a* – формирование двух хромосом отдельных подсистем; *б* – исключение повторяющегося в обоих хромосомах гена; *в* – звездообразная конкатенация индивидуальных и обобщенного генов

Далее начинается основная часть КГА, когда в цикле объект проживает  $T$  эпох до завершения процесса оптимизации. На протяжении нулевой эпохи (номер эпохи  $t = 0$ ;  $t \in T$ ) вначале осуществляется скрещивание, состоящее из четырех операторов: выбора пар, собственно скрещивания (кроссовера), мутации и инверсии.

Пара особей  $A_1$  и  $A_2$  (рис. 2 а) подбирается для скрещивания из  $N$  в соответствии с настройками пользователя (например, случайно). Механизм скрещивания хромосом особей  $A_1$  и  $A_2$  приведен на рис. 2 б. Вначале обычным для ГА способом выполняется оператор кроссовера для обобщенной части хромосом родителей. При этом получается обобщенная часть хромосомы отпрыска.

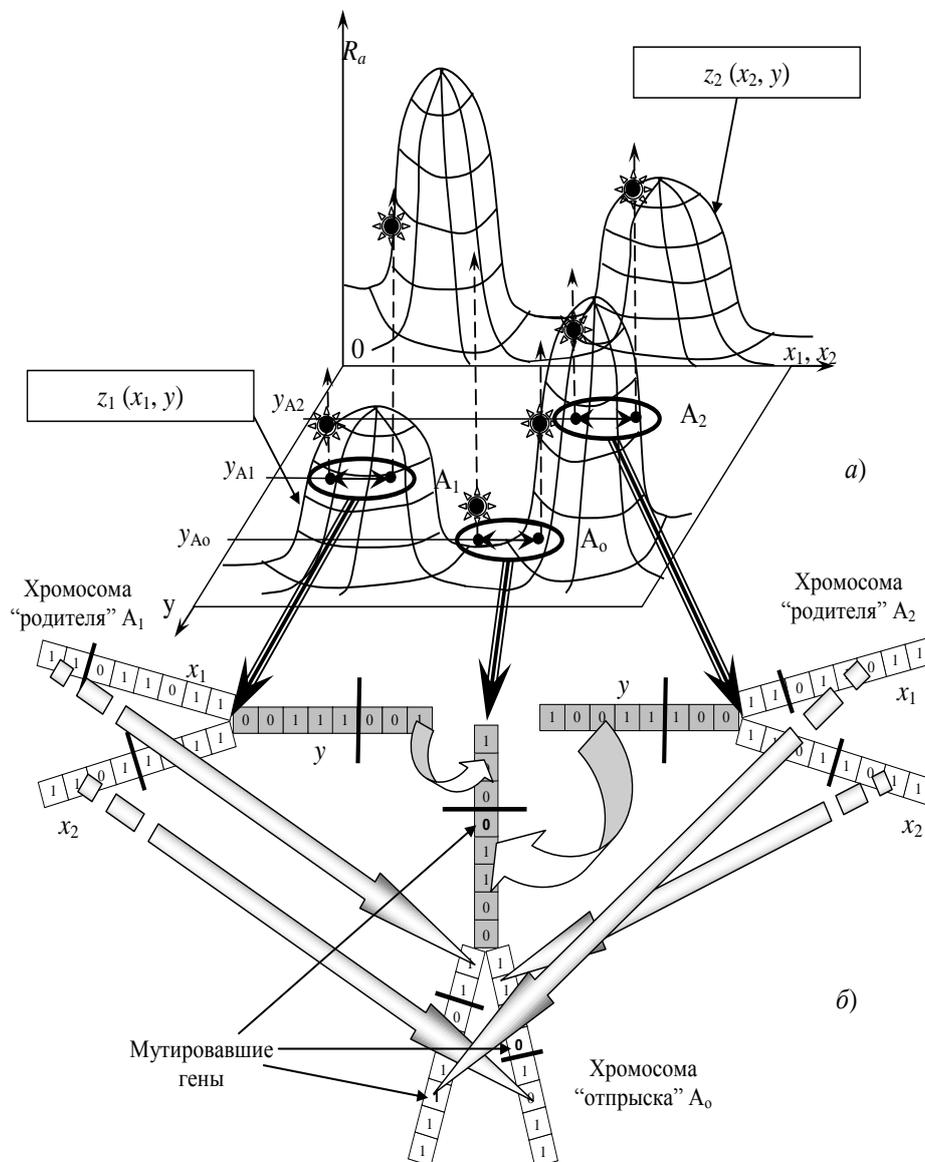


Рисунок 2 – Схема процесса скрещивания в методе КГА:  
 а – уровень фенотипа; б – уровень генотипа

Таким же образом скрещивают отдельно индивидуальные части хромосом особей  $A_1$  и  $A_2$ . Конкатенацией полученных фрагментов получают новую полную звездообразную хромосому. К отдельным ее частям применяют операторы мутации и (если необходимо) инверсии, после чего полученная хромосома отпрыска готова (рис. 2 б).

Далее  $N$  звездообразных хромосом родителей и  $N/2$  хромосом отпрысков подвергаются отбору по величине функции  $P$ .

По окончании отбора из  $1,5 N$  особей оставляют  $N$  лучших по значению  $P$ , остальные  $0,5 N$  уничтожаются (стираются). На этом текущая эпоха процесса оптимизации завершается.

*Критерием общего останова* является отсутствие увеличения всех значений функции  $P$  для всех особей текущей и предпоследней популяций после очередной эпохи. Такой останов считается штатным для алгоритма, т.к. в этом случае он сходится, сходится на оптимуме и сходится за приемлемое время. В противном случае необходимо менять настройки пользователя: количество особей в популяции; метод заселения области решений на нулевом этапе; функция приспособленности  $P$ ; способ нормирования аргументов; структура и длина хромосомы; метод подбора пар; количество и место расположения точек скрещивания; количество и место расположения мутирующих точек; необходимость и методика инверсии; критерий останова.

Схема комплексного генетического алгоритма оптимизации обобщенных систем приведена на рис. 3.

В качестве объекта практического применения КГА использовали технологический процесс механической обработки детали, в котором одновременно задействованы два вращающихся на одном валу режущих инструмента, обрабатывающие разные поверхности. В качестве аргументов выражений (1) и (2) в этом случае выступает количество режущих зубьев у инструментов –  $x_1$  и  $x_2$ , соответственно, и обобщенная скорость их вращения  $y$ ; в качестве целевых функций  $z_1$  и  $z_2$  – шероховатости поверхностей после обработки.

Для условий, принятых при сравнительных испытаниях метода, оптимальные значения  $x_1^* = 6$ ,  $x_2^* = 10$ ;  $y = 630$  об/мин были найдены методом подбора за 2,3 часа, с помощью КГА за 63 с машинного времени.

Таким образом, в работе получен метод решения многоцелевых задач оптимизации многоэкстремальных функций с обобщенными аргументами с помощью комплексного генетического алгоритма. Практические испытания метода на примере комплексной механической обработки деталей показали его работоспособность и техническую эффективность.

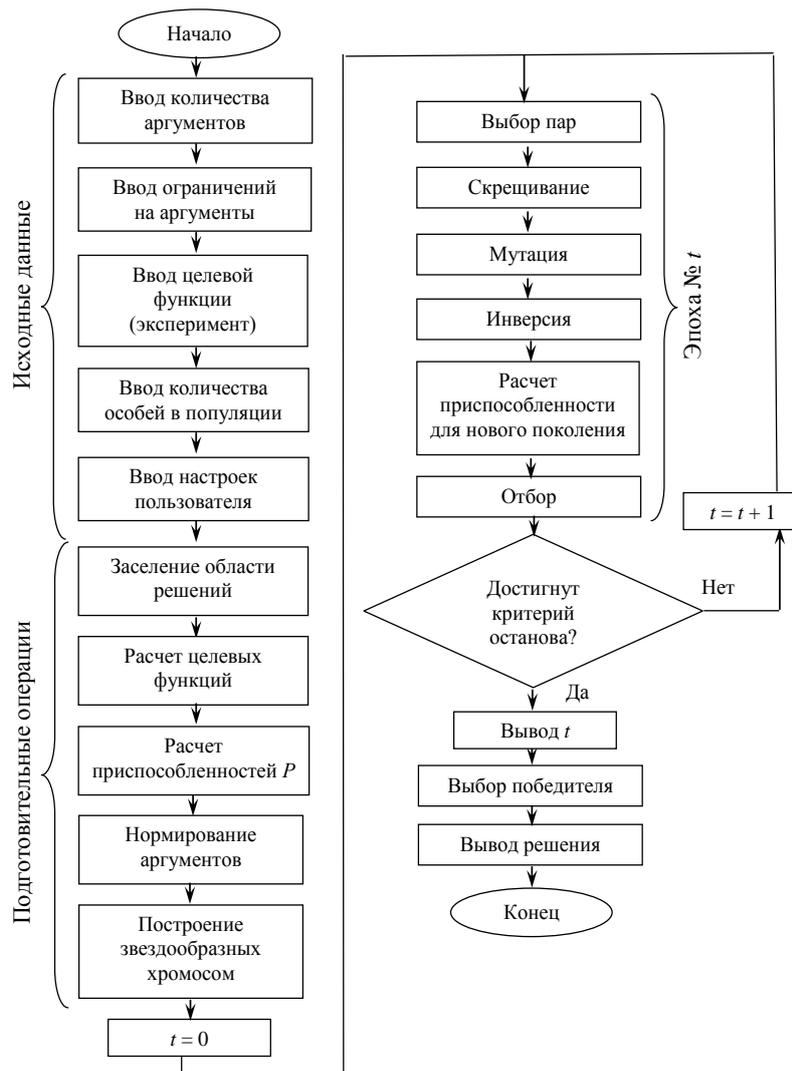


Рисунок 3 – Схема комплексного генетического алгоритма оптимизации

**Список использованных источников:** 1. Гладков Л.А. Генетические алгоритмы / Л.А. Гладков, В.В. Курейчик, В.М. Курейчик. – М: Физматлит, 2006. – 320 с. 2. Гладков Л.А. Биоинспирированные методы в оптимизации / Л.А. Гладков, В.В. Курейчик, В.М. Курейчик. – М: Физматлит, 2009. – 384 с. 3. Рутковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л.Рутковский. – М: Горячая линия-Телеком, 2008. – 452 с. 4. Ротштейн А.П. Интеллектуальные технологии идентификации: нечеткие множества, генетические алгоритмы, нейронные сети / А.П. Ротштейн. – Винница: Универсум-Винница, 1999. – 320 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Gladkov L.A. Geneticheskie algoritmy / L.A. Gladkov, V.V. Kurejchik, V.M. Kurejchik. – M: Fizmatlit, 2006. – 320 s. 2. Gladkov L.A. Bioinspirirovannye metody v optimizacii / L.A. Gladkov, V.V. Kurejchik, V.M. Kurejchik. – M: Fizmatlit, 2009. – 384 s. 3. Rutkovskaja D. Nejronnye seti, geneticheskie algoritmy i nechetkie sistemy / D. Rutkovskaja, M. Pili'n'skij, L.Rutkovskij. – M: Gorjachaja linija-Telekom, 2008. – 452 s. 4. Rotshtejn A.P. Intellektual'nye tehnologii identifikacii: nechetkie mnozhestva, geneticheskie algoritmy, nejronnye seti / A.P. Rotshtejn. – Vinnica: Universum-Vinnica, 1999. – 320 s.

УДК 005.83:62

**В.А. ЗАЛОГА**, д-р техн. наук, **В.М. НАГОРНЫЙ**, канд. техн. наук,  
**К.А. ДЯДЮРА**, канд. техн. наук, Сумы, Украина

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ОБЕСПЕЧЕНИИ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЙ ПРОДУКЦИИ НА ЭТАПАХ ЕЕ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА**

Виконаний аналіз сучасних підходів прийняття техніко-економічних рішень при виготовленні продукції виробничо-технічного призначення. Запропонований методологічний підхід по формуванню управлінських рішень у складних виробничих системах, який може бути застосований для різних виробів машинобудування. Приведені моделі оцінки якості процесів, які орієнтовані на продукт, що дозволяє швидко і ефективно проектувати і виготовляти конкурентоспроможні вироби.

Выполнен анализ современных подходов принятия технико-экономических решений при изготовлении продукции производственно-технического назначения. Предложен методологический подход по формированию управленческих решений в сложных производственных системах, который обеспечивает его применение для различных изделий машиностроения. Приведены модели оценки качества процессов, которые ориентированы на продукт, что позволяет быстро и эффективно проектировать и изготавливать конкурентоспособные изделия.

*V.A. ZALOGA, V.M. NAGORNYJ, K.A. DJADJURA*

*MODELLING OF SYSTEM OF DECISION-MAKING SUPPORT AT MAINTENANCE OF  
MACHINE-BUILDING PRODUCTION COMPETITIVENESS AT STAGES OF ITS LIFE  
CYCLE*

The executed analysis of modern approaches of acceptance of decisions is at making of production of the setting. Methodological approach is offered on forming of administrative decisions in the difficult production systems, which can be for the different wares of engineer. The resulted models of estimation are qualities of processes, which are oriented to the product, that allows quickly and effectively to design and make competitive wares.

*Постановка проблеми.* Перспективы экономического развития любого государства зависят от эффективной организации процессов управления при создании конкурентоспособной продукции, а также задействованных материальных, энергетических и информационных ресурсов. Динамика пространственно-временных отношений между ними способствует процессу эволюции общества и определяет международное сотрудничество, привлекая иностранные инвестиции. Это дает возможность аккумулиро-

вать финансовые ресурсы в рамках национальных проектов. Появление новых знаний в науке и технике создает соответствующие условия и механизмы, стимулирующие внедрение результатов инновационной деятельности в хозяйственную практику. Во многом это определяется развитием высокотехнологичных отраслей промышленности, которые имеют большие перспективы в будущем, но одновременно и высокую степень ответственности перед экономикой.

В настоящее время, к сожалению, по ряду объективных и субъективных причин значительная часть отечественных промышленных товаров не отвечает современному уровню научных достижений и технологическим возможностям, что предопределяет их неконкурентоспособность, как на внешнем, так и на внутреннем рынке в условиях вхождения в ВТО. Одной из главных причин является слабая интеграция большинства наукоемких украинских машиностроительных предприятий в мировую экономику. В результате они не могут на высоком уровне развивать систему разработки и постановки конкурентоспособной продукции на производство, оперативно внедрять результаты научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в практику, а также эффективно использовать современные технологические достижения в мировой и отечественной практике.

Опыт современных высокотехнологичных отраслей промышленности показывает, что производственная деятельность представляет собой сложную иерархическую структуру, которая имеет многоуровневый и многоаспектный характер и определяется системой взаимосвязанных целевых показателей [1]. Управление процессами такой структуры практически невозможно без использования специализированной информационной системы поддержки принятия решений [2], располагающей банком информации о затрачиваемых ресурсах и достигнутых результатах. Вместе с тем, интегрированная информационная среда позволяет осуществлять процедуры унифицированного представления, хранения, структурирования и обмена данными о процессе деятельности; стандартизированного, селективного и регламентируемого доступа к этим данным; их организованного сопровождения и формирования на этой основе управленческих решений.

*Анализ последних исследований и публикаций.* Определяющим фактором успешной деятельности любого предприятия при создании конкурентоспособного изделия является эффективно действующая на нем система управления. Международные стандарты серии ISO 9000 позволяют внедрять на отечественных предприятиях систему управления, основанную на передовом международном опыте. Использование принципов и требований данных стандартов на машиностроительных предприятиях способствует поддержанию их конкурентоспособности и позволяет наладить выпуск продукции требуемого качества на экономически обоснованном уровне.

Вместе с тем, расширение масштабов и усложнение взаимосвязей технических, социальных и экономических систем на стадиях жизненного цикла изделия (ЖЦИ) формирует специфические требования конечных потребителей к качеству продукции производственно-технического назначения (ППТН). В современных условиях рыночных отношений на первый план выходят такие вопросы: полное удовлетворение потребностей потребителя продукции в пределах всех этапов ее жизненного цикла, гарантия безопасности и надежности ППТН, предоставление услуг сервиса, которые соответствуют современным мировым аналогам по показателям качества, срокам и цене. С одной стороны высокий уровень эксплуатации ППТН снижает производственные расходы при выпуске конечной продукции, но с другой стороны требует дополнительных финансовых затрат (оплата дополнительного оборудования, программного обеспечения, материалов, работ и т.п.) для повышения качества на соответствующих этапах ЖЦИ. В реальной практике эти затраты могут существенно отличаться как по объему, так и по срокам, что связано с формированием противоположных решений производителей и потребителей при реализации процессов ЖЦИ. Поэтому улучшение качества ППТН в условиях неопределенности изменения внутренней и внешней среды предприятий требует учета большого числа трудно прогнозируемых, имеющих совершенно разную природу факторов.

При этом цена продукции, как и качество, является главной рыночной характеристикой, которая определяет конкурентоспособность и успешность ее сбыта, в т.ч. и величину прибыли. Этот параметр является одним из важнейших показателей, которые входят в состав наиболее общего критерия эффективности функционирования производственных систем – производительности. Производительность в работе [3] рассматривают как отношение объема продукции, произведенного данной системой за определенный период времени, к количеству ресурсов, потребляемых для создания или производства этой продукции за тот же период.

В связи с этим при модернизации и развитии отечественного машиностроения возникает необходимость системного подхода к снижению непроизводственных затрат, рациональному использованию исходных ресурсов (материальных, энергетических, информационных), внедрению новых технологий и оборудования, увеличивающих объем производимой продукции в единицу времени.

Показателем эффективности совместного функционирования процессов проектирования, изготовления и эксплуатации машиностроительной продукции производственно-технического назначения может быть следующее условие

$$C_{\text{ФПС}} \tau = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{\mu} C_{ij} \tau = K_{\text{ФПС}_j} \tau \rightarrow \min \tau ; \quad (1)$$

$$C_{ij} \tau = C_{ij} \Phi\Pi_{\text{КТС}} + C_{ij} \Phi\Pi_{\text{ПО}} + C_{ij}(\Phi\Pi_{\text{ОП}}),$$

где  $C_{\text{ФПС}} \tau$  - суммарная стоимость затрат всех функциональных подсистем (ФПС) [4, 5] на всех стадиях ЖЦИ в момент времени  $\tau$ ,  $C_{ij} \tau$  - расходы на функциональную подсистему  $i$ -го вида, участвующую в выполнении  $j$ -ой функции в единицу времени  $\tau$ ,  $C_{ij} \Phi\Pi_{\text{КТС}}$ ,  $C_{ij} \Phi\Pi_{\text{ПО}}$ ,  $C_{ij} \Phi\Pi_{\text{ОП}}$  - расходы на группы функциональных подсистем соответственно комплекса технических средств ( $\Phi\Pi_{\text{КТС}}$ ), программного обеспечения ( $\Phi\Pi_{\text{ПО}}$ ) и оперативного персонала ( $\Phi\Pi_{\text{ОП}}$ )  $i$ -го вида участвующих в реализации  $j$ -ой функции;  $\mu$  – количество средств на функционирование подсистем  $i$ -го вида, находящихся на одном иерархическом уровне и необходимых для выполнения  $j$ -ой функции за время  $\tau$ ,  $N$  – число иерархических уровней;  $K_{\text{ФПС}_j} \tau$  – оптимизационный функционал минимизирующей затраты ( $\min$  ( $\tau$ )) в момент времени  $\tau$ .

В современных условиях показатель  $C_{\text{ФПС}} \tau$  из «справочного» параметра, предназначенного для определения необходимых будущих затрат ресурсов на этапах ЖЦИ превращается в один из основных, которые определяют конкурентоспособность продукции, возможные сегменты рынков сбыта, особенности реализации и обеспечения эксплуатации.

Процесс создания стоимости  $C_{\text{ФПС}} \tau$  протекает поэтапно, как на самом предприятии-изготовителе, так и на предприятиях – субпоставщиках и является функцией времени  $\tau$ . Первый этап – проектный состоит из следующих четырех основных стадий:

- разработка технического задания (ТЗ);
- разработка технических предложений (ТП) - оптимизируются и выбираются важнейшие параметры изделия, которые должны обеспечить требования ТЗ;
- эскизное проектирование (ЭП), когда сформированные на предыдущей стадии параметры изделия уточняются и приобретают материальную форму;
- рабочее проектирование (РП) – происходит оформление ранее полученных расчетно-визуальных моделей и образцов в техническую документацию (бумажную или цифровую).

Эти данные, наряду с директивными технологическими материалами, разрабатываемыми на стадии выпуска рабочей конструкторской документации, являются основными для разработки технологических процессов [6].

От того, насколько корректно может быть спрогнозирована и выполнена оценка стоимости будущего изделия и затраты предприятия на его изготовление при установленном (необходимом) качестве (требованиях ТЗ) [7] на ранних стадиях проектирования, во многом будет зависеть ценность продукции для потребителя. Под ценностью понимается, прежде всего, суммарная добавленная стоимость, которая может быть достигнута с этим продуктом на протяжении его жизненного цикла с точки зрения кругооборота в экономике [8].

В настоящее время научно-обоснованные экономико-математические модели для оценки стоимости изделия на самых первых проектных этапах разрабатываются на базе статистической обработки информации из отчетности предприятий, экспертных и иных типах данных о технологии и протекании производственных процессов в прошлом и будущем. В ряде случаев, для предварительного определения будущих затрат на создание продукции предприятия используют метод сопоставления с затратами аналогичного предприятия, сформированными при производстве ближайшего прототипа. При этом алгоритм практической реализации метода однозначно не определен и зависит от целей предприятия, исходных данных и особенностей выпускаемой продукции. Понятно, что в нынешних динамически изменяющихся рыночных условиях организационный и производственный потенциалы предприятий одной отрасли в определенные моменты времени будут разными. Для отечественных машиностроительных предприятий типичной является ситуация, когда 80 и более процентов технологического оборудования имеют «возраст» более 20 лет, а станки с ЧПУ составляют не более 10-15 процентов от общего числа. Кроме того, различна профессиональная структура персонала, количество рабочих, количество оборудования и цехов, включая их территориальную привязку. Использование современных информационных систем и программного обеспечения способствует сокращению времени и затрат при создании нового изделия или модернизации уже существующего.

Поэтому расчеты, выполняемые по статистическим моделям, вряд ли могут быть признаны корректными и, в этой связи, пригодными для практического использования в современных условиях. Из этого следует, что производство дорогостоящей наукоемкой ППТН сегодня требует создания новых алгоритмов, расчетных моделей, методик и пакетов прикладных программ для принятия оптимальных вариантов решений на самых первых этапах ЖЦИ.

*Целью данной работы* является разработка модели и алгоритма принятия эффективных конструкторско-технологических решений на этапе проектирования при выборе оптимального варианта конструкции ППТН и

организации процесса разработки при экономически обоснованном применении ресурсов.

*Основной материал исследований.* Оценка эффективности проекта создания ППТН в работе осуществлялась на основе данных о фактических затратах временных и материальных ресурсов на этапах ЖЦИ.

На *первом этапе* (разработка ТЗ) в результате маркетинговых исследований области использования ППТН, пожеланий заказчиков, требований рынка и деятельности конкурентов выделяют управляемые параметры (рисунок 1):

- $T_{ТР}$  – фактор времени, учитывающий длительность выполнения заказа;
- $C_{ФПС_{ТР}}$  – стоимость ППТН – цена покупки (величина всех затрат, производимых на этапах ЖЦИ), которую может себе позволить заказчик (эксплуатант);
- $X_{ФПС_{ТР}}$  – характеристики ППТН предусмотренные ТЗ.

Эффективность управления определяется принятым диапазоном варьирования параметров.



Рисунок 1 – Формирование требуемых параметров проекта (заказа) изделия

На *втором этапе* (разработка ТП) максимально точно оценивается возможность удовлетворения запросов заказчиков с учетом необходимого количества изделий, темпов выпуска, рыночной цены, предложений кооперирующих организаций (поставщиков основных систем, агрегатов и материалов). При этом рассчитываются объемы необходимых инвестиций и сроки их поступления, определяются и утверждаются проекты лимитной расчетной полной себестоимости изделия и партии.

Определяются плановые параметры возможной реализации ( $T_{пл}$ ,  $C_{ФПС_{Пл}}$ ,  $X_{ФПС_{Пл}}$ ) проекта ППТН (рисунок 2), связанные целевой функцией

$$\bar{X} = \frac{\bar{Q}}{C \cdot T}, \quad (2)$$

где  $\bar{X}$  – плановая характеристика проекта ППТН в безразмерном виде;  $\bar{Q}$  – общая оценка качества, учитывающая соответствие изделия требованиям потребителя;  $\bar{C}_{ФПС}$  – оценка стоимости проекта;  $\bar{T}$  – оценка выполнения проекта по времени.

При разработке изделия определяются проектные его характеристики  $X_{ФПС_{пр}}$ , которые образуют те же группы, что и компоненты вектора  $X_{ФПС_{тр}}$  технических требований. На этом этапе в общих чертах определяют конструкцию проектируемого изделия. Чаще всего исходными данными являются технические результаты предыдущих исследований, идеи, решения и конструкции прототипов. Управление качеством ППТН на стадии разработки состоит в установлении соответствия между требованиями и проектными значениями изделия в целом, а также в оперативном устранении возникающих отклонений

$$\bar{Q} = \sum_{i=1}^N a_i q_i, \quad (3)$$

где  $q_i = \left( \frac{X_{ФПС_{пл\ i}}}{X_{ФПС_{тр\ i}}} \right)^{k_i}$  – относительная удовлетворенность потребителя  $i$ -ым свойством изделия;  $k_i=1$  принимается для свойства, возрастание которого приводит к увеличению удовлетворенности потребителя;  $k_i=(-1)$  принимается для свойства, возрастание которого приводит к уменьшению удовлетворенности потребителя;  $a_i$  – весовой коэффициент, учитывающий значимость для потребителя  $i$ -ого свойства изделия.

Планируемое время выполнения проекта создания изделия  $T_{пл}$  соответствует общему сроку от выдачи заказа до доставки изделия заказчику/заказчикам. Оно является суммой времени на подготовку и организацию, оснащение и производство, испытание, транспортировку и хранение, а также дополнительного времени, например, на упаковку, маркировку и т.д.



Рисунок 2 – Схема формирования плановых параметров управления проектом

Норматив трудоемкости на проектирование изделия (термин соответствует его значению согласно ГОСТ 2.101) может быть рассчитан по формуле [9, 10, 11]:

$$T_0 = \sum T_i K_1 K_2 \dots K_n, \quad (4)$$

где  $T_i$  – норматив трудоемкости определенной стадии или этапа проектирования, час;  $K_1, K_2, K_n$  – поправочные коэффициенты к нормативу трудоемкости.

Укрупненные нормативы, как правило, определяются для всех стадий проектирования изделий, предусмотренных стандартами ЕСКД (ДСТУ 3943, ГОСТ 2.102, ГОСТ 2.103, ГОСТ 2.105, ГОСТ 2.106, ГОСТ 2.118, ГОСТ 2.119, ГОСТ 2.120, ГОСТ 2.301).

Основными факторами, принятыми при определении трудоемкости системы разработки и постановки продукции на производство, является новизна и сложность как самого изделия, так и разрабатываемой конструкторской документации. Степень влияния других факторов на величину трудоемкости, как правило, учитывается поправочными коэффициентами.

Результатом функциональной подсистемы проектирования ( $\Phi ПС_{ПР}$ )  $j$ -го изделия является производственная функция  $F_j$ , которая показывает возможности выбранного варианта  $\Phi ПС_{ПРj}$  по конструкторско-технологическому обеспечению и пропорциональна имеющемуся запасу разработок и реализаций  $I_j t_k$ , нормативу трудоемкости на проектирование изделия  $T_0$ , расходам на единицу средства  $i$ -го вида, которые участвуют в выполнении  $j$ -ой функции в единицу времени  $\tau$ , соответственно,  $C_j \Phi П_{КТС}$ ,  $C_j \Phi П_{ПО}$  и  $C_j \Phi П_{ОП}$ :

$$F_j = f I_j t_k, T_{0j}, C_j(\Phi П_{КТС}), C_j \Phi П_{ПО}, C_j \Phi П_{ОП}. \quad (5)$$

Для типов средств, находящихся в стадии разработок  $I_j t_k$  НИР и/или ОКР, оценка затрат определяется как сумма средств, необходимых для ускоренного проведения работ: патентный поиск, приобретение лицензий, спецоборудования, сертификации изделия и т.д.

Производственные функции  $G$  и  $Q$  [12] обеспечивают управление изделием соответственно с точки зрения изготовления и эксплуатации. Средства функциональных подсистем  $\Phi ПС_j$ , которые включают множество типов элементов ( $\Phi П_{КТС}$ ,  $\Phi П_{ПО}$ ,  $\Phi П_{ОП}$ ), позволяют управлять данными параметрами.

Объемным показателем стоимости комплекса технических средств  $C_{ij} \Phi П_{КТС}$  (кроме малоценных и быстроизнашивающихся) является:

$$C_j(\Phi\Pi_{\text{КТС}}) = C_{\text{КТС}_j} + Z_{\text{м.ф}_j} \quad (6)$$

где  $C_{\text{КТС}_j}$  – среднегодовая балансовая стоимость комплекса технических средств (КТС);  $Z_{\text{м.ф}_j}$  – затраты на модернизацию.

Балансовую стоимость КТС можно определить по формуле:

$$C_{\text{КТС}_j} = \sum_{i=1}^n \Pi_{\text{КТС}_i} \cdot N_{\text{КТС}_i} \quad (7)$$

где  $n$  – количество видов технических средств;  $\Pi_{\text{КТС}_i}$  – цена единицы  $i$ -го технического средства;  $N_{\text{КТС}_i}$  – количество единиц технических средств.

Затраты на оперативный персонал  $C_j \Phi\Pi_{\text{ОП}}$  представляют собой сумму

$$C_j(\Phi\Pi_{\text{ОП}}) = \Phi_{\text{З.П}_j} + \Phi_{\text{М.П}_j} + Z_{0j} + Z_{\text{П.П}_j} + Z_{\text{П.К}_j}, \quad (8)$$

где  $\Phi_{\text{З.П}_j}$  – фонд заработной платы персонала предприятия;  $\Phi_{\text{М.П}_j}$  – фонд материального поощрения;  $Z_{0j}$  – затраты на обучение персонала;  $Z_{\text{П.П}_j}$  – расходы на переподготовку персонала;  $Z_{\text{П.К}_j}$  – затраты на повышение квалификации персонала.

Стоимость программного обеспечения  $C_j \Phi\Pi_{\text{ПО}}$  можно представить в виде функции

$$C_j \Phi\Pi_{\text{ПО}} = C_{\text{С.О}_j} + C_{\text{П.П}_j} + C_{\text{Б.Д}_j} + C_{\text{В.С}_j} \quad (9)$$

где  $C_{\text{С.О}_j}$  – стоимость системного обеспечения;  $C_{\text{П.П}_j}$  – стоимость прикладных программ;  $C_{\text{Б.Д}_j}$  – стоимость системы управления данными об изделии (PDM);  $C_{\text{В.С}_j}$  – стоимость внешних информационных ресурсов, в т.ч. и Internet ресурсов.

На следующем, *третьем этапе* (ЭП) осуществляется разработка самого изделия: определяются габаритные размеры конструкции в целом, выбирается конструкционный материал, устанавливаются производственные и иные ограничения. Проектные решения, принимаемые на этой стадии, в основном и определяют себестоимость будущего изделия.

На *четвертой проектной стадии* ЖЦИ (РП) осуществляют детализацию изделия, выполняют расчеты конструктивных элементов и блоков, а также всего изделия и оформляют его в технических чертежах и спецификациях. На этой стадии определяют процессы изготовления, осуществляют планирование работ и подготовку производства происходит планирование времени разработки и изготовления самого изделия, а также доставки его потребителю, в форме графиков работ.

Очевидно, что здесь приведены не все процедуры предшествующие разработке изделия на ранних этапах ЖЦИ, но и этих данных достаточно,

чтобы констатировать – управление параметрами стоимости, времени и качества в процессе проектирования и комплектации становится решающим фактором обеспечения конкурентоспособности ППТН.

Как уже отмечалось, под воздействием внутренних и внешних возмущающих факторов может происходить отклонение управляемых параметров проекта от нормативных значений на каждом этапе ЖЦИ, что будет сопровождаться соответствующим изменением фактической характеристики проекта (рисунок 3).

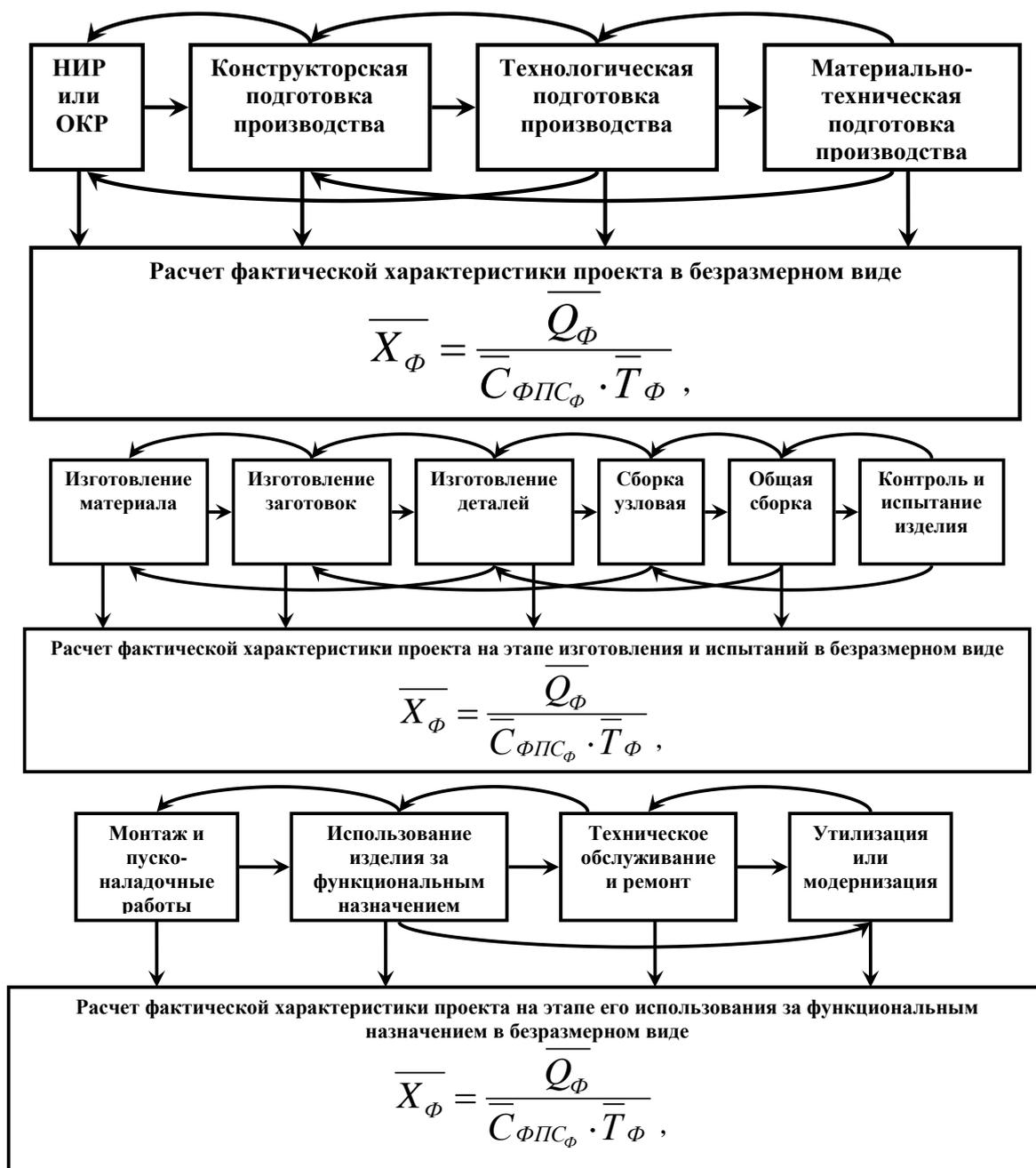


Рисунок 3 – Схема формирования фактических параметров проекта на этапе ЖЦИ

Управление проектом изделия может осуществляться путем минимизации следующего функционала:

$$U = \sum \left[ \left( 1 - \frac{\bar{Q}}{\bar{C}_{\text{ФПС}} \cdot \bar{T}} \right)^2 + 1 - D^2 \right], \quad (10)$$

где  $D$  – функция Харрингтона (функция желательности) [13], которую можно определить с помощью выражения

$$D = \sqrt{\exp(-\exp(-\bar{T})) \cdot \exp(-\exp(-\bar{C}_{\text{ФПС}}))}. \quad (11)$$

При этом расчеты можно производить двумя методами:

- 1) путем варьирования времени реализации проекта на этапах ЖЦИ определять его стоимость;
- 2) путем варьирования стоимости проекта определять временные затраты на него.

Получаемые при этом параметры остаются безразмерными. Для получения размерных величин их следует умножить, соответственно, на фактические затраты времени и стоимости на разработку и производство соответствующего прототипа.

В качестве примера использования приведенных зависимостей, рассмотрим эффективность текущего проекта на основе данных о фактических затратах временных и материальных ресурсов, имевших место при разработке и производстве прототипа. Соотношением между плановыми и фактически реализованными значениями материальных и временных ресурсов было принято следующим:

- плановая стоимость разработки прототипа  $C_{\text{ФПС}_{\text{пл}}}=5$  тыс. грн;
- фактически реализованная стоимость разработки прототипа  $C_{\text{ФПС}_{\text{ф}}}=10$  тыс. грн;
- плановая длительность разработки прототипа  $T_{\text{пл}}=100$  часов;
- фактически реализованная длительность разработки прототипа  $T_{\text{ф}}=200$  часов.

Отношение нижней границы прогнозируемой длительности текущей разработки к длительности разработки прототипа  $T_{\text{н}}=1,3$ .

Отношение верхней границы прогнозируемой длительности текущей разработки к длительности разработки прототипа  $T_{\text{в}}=2,5$ .

Отношение нижней границы прогнозируемой стоимости текущей разработки к стоимости разработки прототипа  $C_{\text{ФПС}_{\text{н}}}=1,3$ .

Отношение верхней границы прогнозируемой стоимости текущей разработки к стоимости разработки прототипа  $C_{\text{ФПС}_{\text{в}}}=2,5$ .

**Метод 1.** При варьировании длительности разработки использовалась следующая экспоненциальная зависимость стоимости разработки от ее длительности

$$C_{\Phi PC} = C_{\Phi PC0} \cdot e^{g \cdot (T_i - T_0)} \quad (12)$$

или в безразмерном виде

$$\bar{C}_{\Phi PC} = e^{\ln C_{\Phi PCe} / C_{\Phi PC0} / (1 - T_0 / T_e) \cdot \bar{T}_i - 1}, \quad (13)$$

где  $C_{\Phi PC0} = C_{\Phi PCnl}$ ;  $g$  - параметр, характеризующий качество управления проектами в данной организации.

Расчет показал, что при превышении длительности разработки текущего проекта на треть длительности разработки прототипа ( $\bar{T} = 1,3$ ), фактическая стоимость превысит стоимость разработки и производства прототипа в шесть раз ( $\bar{C}_{\Phi PC} = 6,034$ ). При этом согласно выражению (7) получено значение функции желательности  $D = 0,87$ , что определяет проект как *отличный*.

При линейной зависимости стоимости разработки от ее длительности Расчет производился по следующей формуле

$$C_{\Phi PC} = C_{\Phi PC0} + \frac{C_{\Phi PCe} - C_{\Phi PC0}}{T_e - T_{Пл}} \cdot T_i - T_{Пл} \quad (14)$$

или в безразмерном виде

$$dC_{\Phi PC} = \frac{C_{\Phi PCe} - C_{\Phi PC0} \cdot T_i - 1}{\left(1 - \frac{T_{Пл}}{T_e}\right)}. \quad (15)$$

Расчет показал, что при превышении длительностью разработки на треть ( $\bar{T} = 1,3$ ), стоимость увеличивается на 57% ( $\bar{C}_{\Phi PC} = 1,57$ ), а функция желательности  $D = 0,786$  определяет проект как *хороший*.

**Метод 2.** При варьировании стоимости можно использовать следующую безразмерную зависимость длительности от стоимости, полученную на основе формулы (13) путем ее решения относительно безразмерного времени  $t$

$$\bar{T} = 1 + \frac{\ln \bar{C}_{\Phi PC}}{\ln \left( \frac{C_{\Phi PCe}}{C_{\Phi PC0}} \right)}. \quad (16)$$

Расчет показал, что при превышении стоимости текущей разработки на треть стоимости разработки прототипа ( $\bar{C}_{\Phi PC} = 1,3$ ), длительность раз-

работки увеличится на 4%, а функция желательности  $D=0,73$  дает возможность оценить проект как *хороший*.

При варьировании стоимости можно использовать также и безразмерную зависимость, полученную из формулы (15) путем ее решения относительно безразмерного времени  $\bar{T}$

$$T = 1 + \frac{dC_{\text{ФПС}}}{C_{\text{ФПС}e} - C_{\text{ФПС}0} \cdot \left(1 - \frac{T_{\text{Пл}}}{T_e}\right)} \quad (17)$$

Расчет показал, что при превышении стоимости разработки прототипа на треть ( $\bar{C}_{\text{ФПС}}=1,3$ ), длительность разработки возрастет на 16% ( $\bar{T}=1,16$ ), а функция желательности ( $D=0,746$ ) определяет проект как *хороший*.

Таким образом, в данном случае анализ полученных результатов расчетов управляемых параметров проекта можно сделать выводы, что:

- при варьировании длительности разработки, увеличение ее на треть, приводит в зависимости от вида принятой функции между управляемыми параметрами к изменению стоимости и функции желательности в следующих пределах:  $\bar{C}_{\text{ФПС}}=6,03...1,57$ ,  $D=0,872...0,786$ ;

- при варьировании стоимостью разработки, увеличение ее на треть, приводит к изменению длительности разработки по отношению к длительности разработки прототипа в следующих пределах:  $\bar{T}=1,04...1,16$  ( $D=0,732...0,786$ ).

Как видим, вид функциональной зависимости между управляемыми проектами заметно сказывается на их прогнозной величине. Если использовать показательную функцию вида

$$C_{\text{ФПС}} = C_{\text{ФПС}0} + \alpha T - T_0^\beta, \quad (18)$$

то можно получить усредненные оценки стоимостных и временных характеристик проекта. Следует учитывать то, что для получения достоверных оценок искомых значений стоимости и длительности текущей разработки, параметры  $\alpha$  и  $\beta$  следует определять на относительно большем количестве прототипов.

В настоящее время все возрастающее значение получает прогноз поведения изделия во время эксплуатации и, особенно, в неопределенных условиях его применения. Любая задержка в проектировании, изготовлении и доставке продукции не только вызывает риск невыполнения контракта в целом, но также связывает капитал предприятия на:

- материал в обороте;

- незавершенную продукцию;
- нерациональные затраты на оборудование, например, станки, и персонал.

При этом, если рассматривать задачу управления как обеспечение существенного повышения конструкторско-технологического обеспечения, то наибольший приоритет необходимо придать функции  $F$ , которая позволяет управлять изделием как объектом совершенствования.

**Выводы.** Предложенный методологический подход по формированию управленческих решений в сложных производственных системах носит достаточно общий характер, обеспечивая его применение для различных изделий машиностроения. Анализ процессов на этапах полного ЖЦИ позволяет находить способы рационального проектирования, изготовления и эксплуатации. Разработанный алгоритм поддержки принятия решений может быть полностью интегрирован с системой менеджмента качества организации. Использование приведенного подхода позволяет описать объект управления в виде иерархической системы, а процессы деятельности декомпозировать до уровня операции и действий каждого элемента такой системы. В дальнейшем предполагается рассмотрение и применение разработанной методологии для решения оптимизационных экономических задач и расчета показателей эффективности управления тем или иным машиностроительным проектом.

**Список использованных источников:** 1. Буряк Ю.И. Управление в многообъектных организационных схемах. II. Принципы реализации информационной поддержки управленческих решений / Ю.И. Буряк, В.В. Инсаров. - (Системный анализ и исследование операций) // Известия РАН. Теория и системы управления. - 2006.- N 2. - С. 84-102. - Библиогр.: с. 102 (7 назв.). 2. Буряк Ю. И. Управление в многообъектных организационных системах. III: Параметрическая оптимизация в системе с несколькими целевыми функциями / Ю.И. Буряк, В.В. Инсаров. - (Системный анализ и исследование операций) // Известия РАН. Теория и системы управления. - 2007. - N 5.- С. 89-99. - Библиогр.: с. 99 (10 назв.). 3. Синк Д.С. Управление производительностью: планирование, измерение и оценка, контроль и повышение: Пер. с англ. / Общ. ред. и вступ. ст. В.И. Данилова-Данильянова. – М.: Прогресс, 1989. – 528 с. 4. Залогова В.А. Функциональный подход к проектированию машиностроительного изделия / В.А. Залогова, К.А. Дядюра // Сучасні технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. – Харків: НТУ „ХПІ”, 2010. – вип.5. – С. 18-31. 5. Залогова В.А. Функциональный подход к процессам изготовления машиностроительного изделия / В.А. Залогова, К.А. Дядюра // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2010. – вып. 78 – С. 46 – 58. 6. Кривов Г.А. Стоимость – важнейший параметр проекта гражданского самолета и показатель его конкурентоспособности / Г.А. Кривов // Технологические системы. – Киев, 2009. – С. 22 – 36. 7. Бушуев С.Д. Креативные технологии управления проектами и программами / Бушуев С.Д., Бушуева Н.С., Бабаев И.А. и др. // Мнография. – д.т.н., проф., К.: «Саммит-Книга», 2010. – 768 с. 8. Весткемпер Э. Введение в организацию производства: Учеб. пособие / Э. Весткемпер, М.Декер, Л. Ендоуби, А.И.

Грабченко, В.Л. Доброскок; пер. с нем.; под об ред. А.И. Грабченко. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2008. – 376 с. **9.** Міжгалузеві норми часу на розроблення конструкторської документації // Міністерство праці України, Національний центр продуктивності. – Краматорськ, 2007. – 110 с. **10** Міжгалузеві нормативи трудомісткості проектування засобів технологічного оснащення // Міністерство праці України, Національний центр продуктивності. – Краматорськ, 1997. – 100 с. Міжгалузеві укрупнені норми часу на розроблення технологічної документації // Міністерство праці України, Національний центр продуктивності. – Краматорськ, 2005. – 132 с. **11.** Залого В.А. Синергетическая картина непрерывного перехода между режимами реализации машиностроительного изделия / В.А. Залого, К.А. Дядюра, О.В. Ющенко и др. // SaTCIP - Journal of Research and Development in Mechanical Industry (JRaDMI), Vol. 1, no. 1, pp. 77, 2009. **12.** Harrington E.C. The Desirability Function // Industrial Quality control. — 1965. — Vol. 21, N 10. — P. 494—498.

**Bibliography (transliterated):** 1. Burjak Ju.I. Upravlenie v mnogoob#ektnyh organizacionnyh shemah. II. Principy realizacii informacionnoj podderzhki upravlencheskih reshenij / Ju.I. Burjak, V.V. Insarov. - (Sistemnyj analiz i issledovanie operacij) // Izvestija RAN. Teorija i sistemy upravlenija. - 2006.- N 2. - S. 84-102. - Bibliogr.: c. 102 (7 nazv.). 2. Burjak Ju. I. Upravlenie v mnogoob#ektnyh organizacionnyh sistemah. III: Parametricheskaja optimizacija v sisteme s neskol'kimi celevymi funkcijami / Ju.I. Burjak, V.V. Insarov. - (Sistemnyj analiz i issledovanie operacij) // Izvestija RAN. Teorija i sistemy upravlenija. - 2007. - N 5.- S. 89-99 . - Bibliogr.: c. 99 (10 nazv.). 3. Sink D.S. Upravlenie proizvoditel'nost'ju: planirovanie, izmerenie i ocenka, kontrol' i povyshenie: Per. s ang. / Obw. red. i vstup. st. V.I. Danilova-Danil'janova. – M.: Progress, 1989. – 528 s. 4. Zaloga V.A. Funkcional'nyj podhod k proektirovaniju mashinostroitel'nogo izdelija / V.A. Zaloga, K.A. Djadjura // Suchasni tehnologii v mashinobuduvanni: zb. nauk. prac'. – Harkiv: NTU „HPI”, 2010. – vip.5. – S. 18-31. 5. Zaloga V.A. Funkcional'nyj podhod k processam izgotovlenija mashinostroitel'nogo izdelija / V.A. Zaloga, K.A. Djadjura // Rezanje i instrument v tehnologicheskix sistemah: Mezhdunar. nauch.-tehn. sb. – Har'kov: NTU «HPI», 2010. – vyp. 78 – S. 46 – 58. 6. Krivov G.A. Stoimost' – vazhnejshij parametr proekta grazhdanskogo samoleta i pokazatel' ego konkurentosposobnosti / G.A. Krivov // Tehnologicheskie sistemy. – Kiev, 2009. – S. 22 – 36. 7. Bushuev S.D. Kreativnye tehnologii upravlenija proektami i programmami / Bushuev S.D., Bushueva N.S., Babaev I.A. i dr. // Mnografija. – d.t.n., prof., K.: «Sammit-Kniga», 2010. – 768 s. 8. Vestkemper Je. Vvedenie v organizaciju proizvodstva: Ucheb. posobie / Je. Vestkemper, M.Deker, L. Endoubi, A.I. Grabchenko, V.L. Dobroskok; per. s nem.; pod ob red. A.I. Grabchenko. – Har'kov: NTU «HPI», 2008. – 376 s. 9. Mizhgaluzevi normi chasu na rozroblennja konstruktors'koї dokumentacii // Ministerstvo pracі Ukraїni, Nacional'nij centr produktivnosti. – Kramators'k, 2007. – 110 s. 10 Mizhgaluzevi normativi trudomistkosti proektuvannja zasobiv tehnologichnogo osnawennja // Ministerstvo pracі Ukraїni, Nacional'nij centr produktivnosti. – Kramators'k, 1997. – 100 s. Mizhgaluzevi ukрупneni normi chasu na rozroblennja tehnologichnoї dokumentacii // Ministerstvo pracі Ukraїni, Nacional'nij centr produktivnosti. – Kramators'k, 2005. – 132 s. 11. Zaloga V.A. Sinergeticheskaja kartina nepreryvnogo perehoda mezhdu rezhimami realizacii mashinostroitel'nogo izdelija / V.A. Zaloga, K.A. Djadjura, O.V. Juwenko i dr. // SaTCIP - Journal of Research and Development in Mechanical Industry (JRaDMI), Vol. 1, no. 1, pp. 77, 2009. 12. Harrington E.C. The Desirability Function // Industrial Quality control. — 1965. — Vol. 21, N 10. — P. 494—498.

*Н. П. МАЗУР*, д-р техн. наук,  
*М. Л. ЯНОВСЬКИЙ*, Хмельницький, Україна

## **ЦИФРОВАЯ ДИСТРИБУЦИЯ СЕРТИФИЦИРОВАННОГО УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА И СОПУТСТВУЮЩИХ ИНФОРМАЦИОННЫХ РЕСУРСОВ**

У статті викладені нові підходи в методах поширення цифрового контенту, захисту від несанкціонованого копіювання. Показано теоретичні основи й приклад практичної реалізації індивідуального підходу до споживача цифрового інформаційного продукту.

В статье изложены новые подходы в методах распространения цифрового контента, защиты от несанкционированного копирования. Показаны теоретические основы и пример практической реализации индивидуального подхода к потребителю цифрового информационного продукта.

*N. P. MAZUR, M. L. JANOVS'KIJ*  
*DIGITAL DISTRIBUTION OF THE CERTIFICATED TEACHING MATERIAL AND  
ACCOMPANYING INFORMATION RESOURCES*

The article deals with the new approaches in methods of digital content distribution and copy protection. There have been shown the theoretical basics and the example of realization of the individual approach to a customer of a digital information ware.

*1. Цель проекта:* создание и практическая реализация системы распространения сертифицированного цифрового контента.

Под цифровым контентом подразумевается: учебные материалы, тестовые задания, виртуальные лабораторные работы, подписные издания, нормативные документы и любой иной материал в цифровой форме, предназначенный для распространения по подписке либо свободно распространяемый.

*2. Главная особенность проекта:* разделение информации и носителя, выбор и реализация оптимальных методов индексации. Информация, отделенная от носителя и проиндексированная на уровне информационного содержания, независимо от носителя - позволяет реализовать публикации в различных формах (WEB, CD, в виде справочного или исполняемого файла и т.д.), и в различной комплектации (индивидуально для каждого потребителя или подписчика контента).

*Примечание.* В наших изысканиях мы опираемся на опыт работы с информацией, имеющий тысячелетние традиции. Обратимся, для примера, к Библии:

"Nil sub sole novum. Ничто не ново под солнцем" *Библия, Книга Экклезиаста, Глава 1, Стих 10.*

Или возьмем Коран: "Бог един" *Коран, 4:169*

Обратите внимание, что как бы и на чем бы издатель не публиковал Библию, Коран или любой другой древний текст - ссылка "*Библия, Книга Экклезиаста, Глава 1, Стих 10*" или "*Коран, 4:169*" всегда будет указывать на одну и ту же информацию. Предлагаемая схема следующая: ссылка идет - на информацию, не зависимо от носителя. Хотя есть и противоположные схемы, например Интернет (рис.1а), построенные на связи документов, содержащих информацию. Наш подход построен на связи фактов (информации), издаваемых на различных носителях, в различных вариантах (рис.1б).

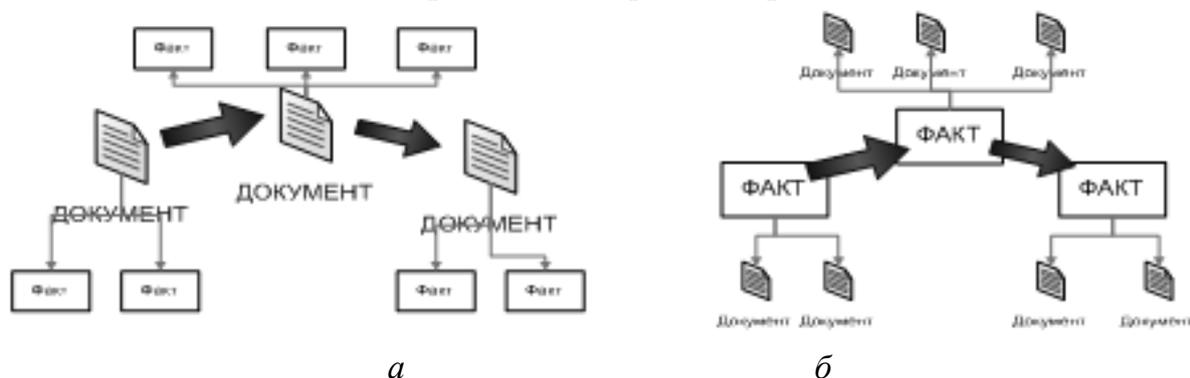


Рисунок 1 – Принципы построения: а – Интернета;

б – разработанного проекта системы дистанционного обучения

Что это дает? Единожды правильно обработанный и загруженный в соответствующую информационную структуру сертифицированный учебный материал и сопутствующий ему контент будут доступны для отображения различными методами, на различных носителях. И, что не менее важно, в различной комплектации, согласно требуемому подписчиком объему (каждый получает совершенно индивидуальный набор информационных ресурсов, что исключает их несанкционированное распространение, вплоть до того, что студент получает электронный учебник, в котором *только его индивидуальные задания* – с бумажными изданиями такое реализовать невозможно).

3. *Аналоги.* Системы подготовки и распространения цифрового информационного контента – наиболее применяемые в повседневной практике программного обеспечения. В последнее время наблюдается некоторая миграция в сторону индивидуализации в подходах к цифровой дистрибуции (Apple App Store, Microsoft Marketplace, Steam), но так или иначе – все известные на сегодня системы оперируют на уровне пусть и индивидуального, но распространения готовых блоков информации – никто не компилирует сборку индивидуально каждому потребителю.

4. *Отличие предлагаемого проекта от аналогов.* Аналогичные проекты доставки цифрового контента потребителю предполагают копирование всем адресатам одного и того же информационного содержимого, либо привязку к определенному носителю, формату, способу доставки. Копирование единого информационного блока для всех потребителей – прямой путь к несанкционированному распространению, пиратству. Нами предлагается и реализуется совершенно иной подход, основанный на строго индивидуальном учете потребностей каждого пользователя нашей системы.

5. *Краткое описание проекта.* Приведенные далее примеры реализации проекта (копии экранов) взяты из проектов выполненных для ХНУ и для МОН Украины.

#### 5.1. *Общая структура системы.*

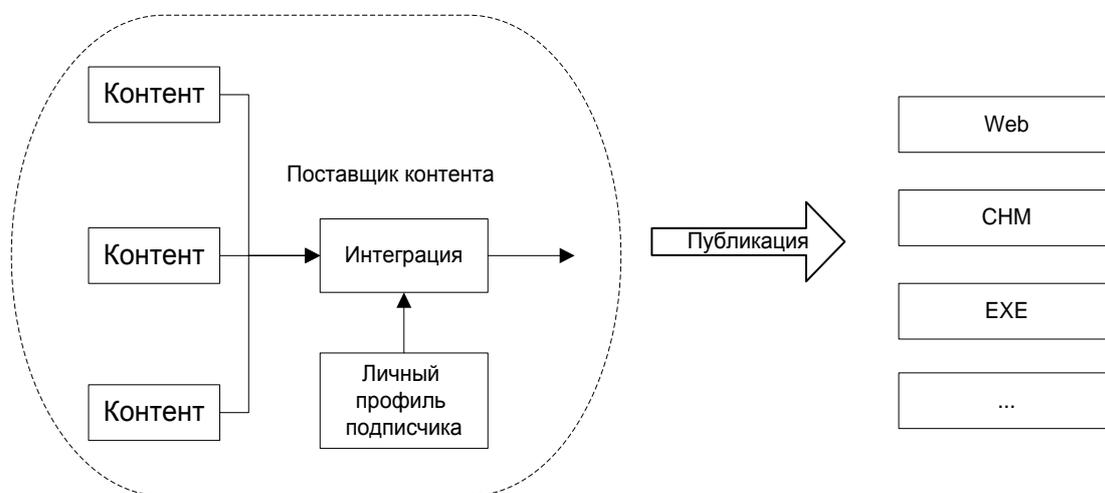


Рисунок 2 – Схема сборки пакета цифрового контента

Сейчас широко распространена практика, когда студент, преподаватель, ученик, любой иной пользователь, скачивает контент и сам интегрирует (инсталлирует) компоненты на своем компьютере. Получая доступ к исходным компонентам (программам, справочникам, учебникам) и методам их интеграции (инсталляции) – никто не удержится от их несанкционированного копирования (пиратства).

*Предложенный подход базируется на том, что сборка пакета цифрового контента происходит на стороне дистрибутора (поставщика) контента, согласно личного профиля подписчика (Рис. 2). Это значит, что каждый подписчик получает свой собственный, сугубо индивидуальный пакет контента.*

#### 5.2. *Загрузка контента в базу.*

В проекте дистанционного обучения ХНУ предусмотрено формирование библиотеки учебного материала, базы тестовых заданий и лабораторных работ. В любой момент можно расширить номенклатуру загружае-

мого контента – это не приведет к изменению структуры данных и программного обеспечения.

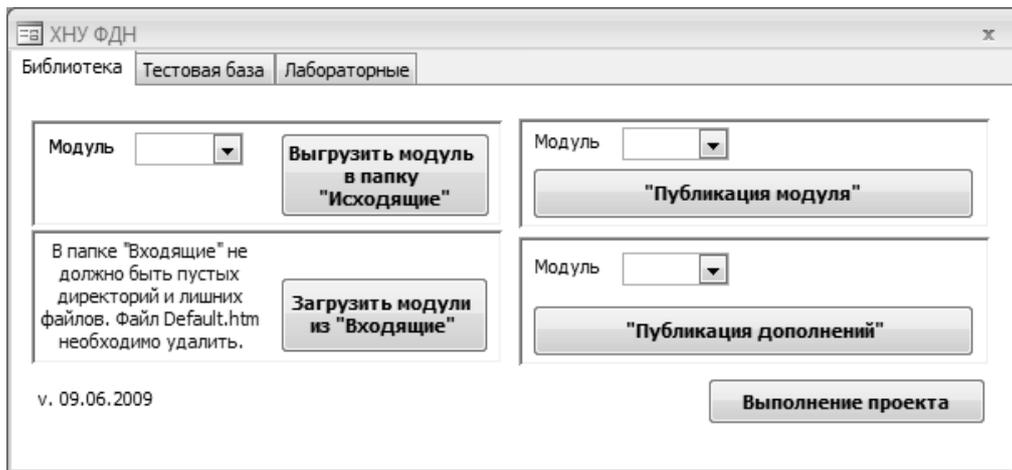


Рисунок 3 – Утилита загрузки контента в базу (ЗФДН ХНУ)

Контент для загрузки готовится заранее автором учебного материала в Word. Требования к формату и именам файлов очень простые и от автора не требуется никаких знаний ни в области HTML, ни в области дизайна и всего прочего. С данной утилитой, что загружает (публикует) контент в базу будут работать всего несколько человек, обслуживающих базу, но не автор, как в других системах (рис.4).

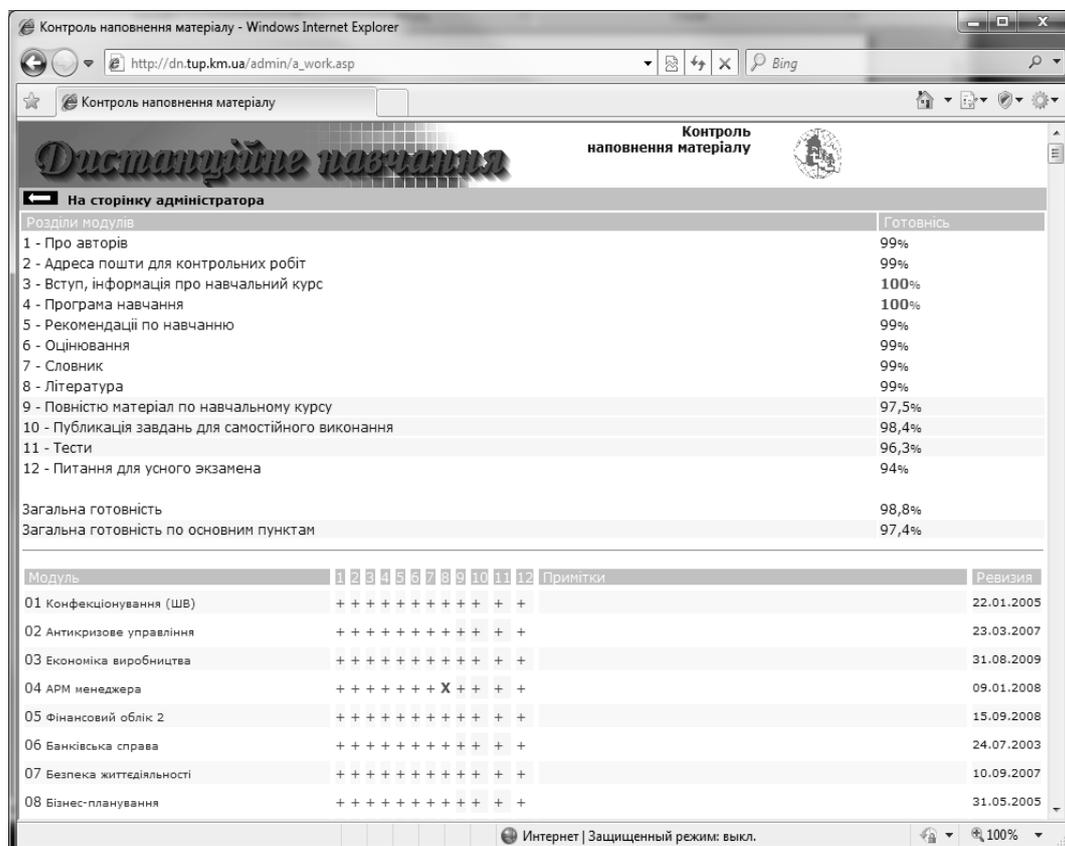


Рисунок 4 – Пример загрузки учебного материала

### 5.3. Публикация контента.

Как показано на рисунке 5, на данный момент в базу ЗФДН ХНУ загружено 1044 полных учебных курсов (многие уже претерпели до 5-7 переизданий, перезагрузок), в которых более 150 тысяч иллюстраций. 2588 тестов, содержащих более 204 тысяч вопросов.

Информация учебного курса может быть представлена в различных формах: в системе ДО ХНУ (рис.6), в итоговой форме проекта банка дистанционных курсов МОН Украины (рис.7) или в составе «сборки» подготовленной для публикации на CD диске (рис.8). Вот это и есть пример независимости информации от формы отображения.

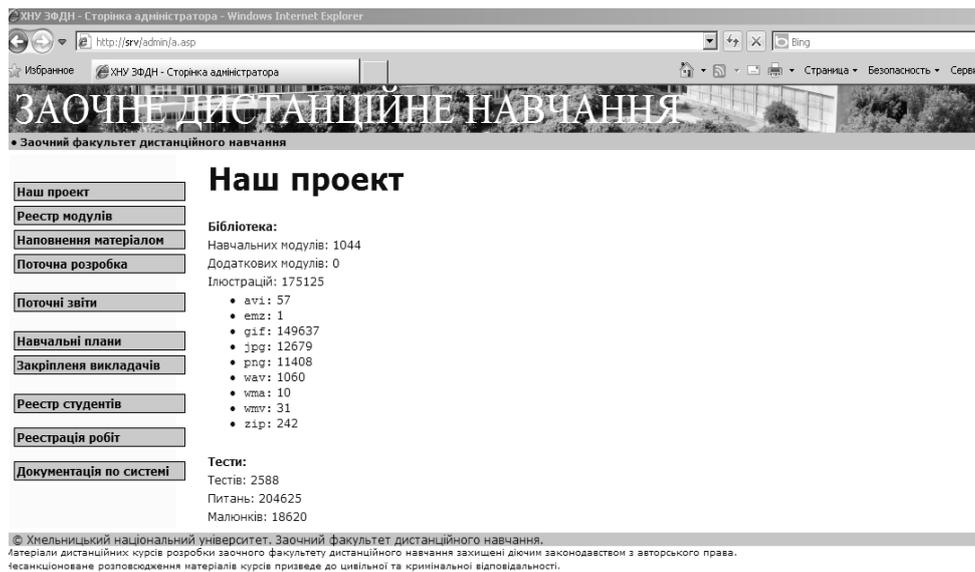


Рисунок 5 – Общие характеристики проекта



Рисунок 6 – Пример первой страницы учебного курса системы ДО ХНУ

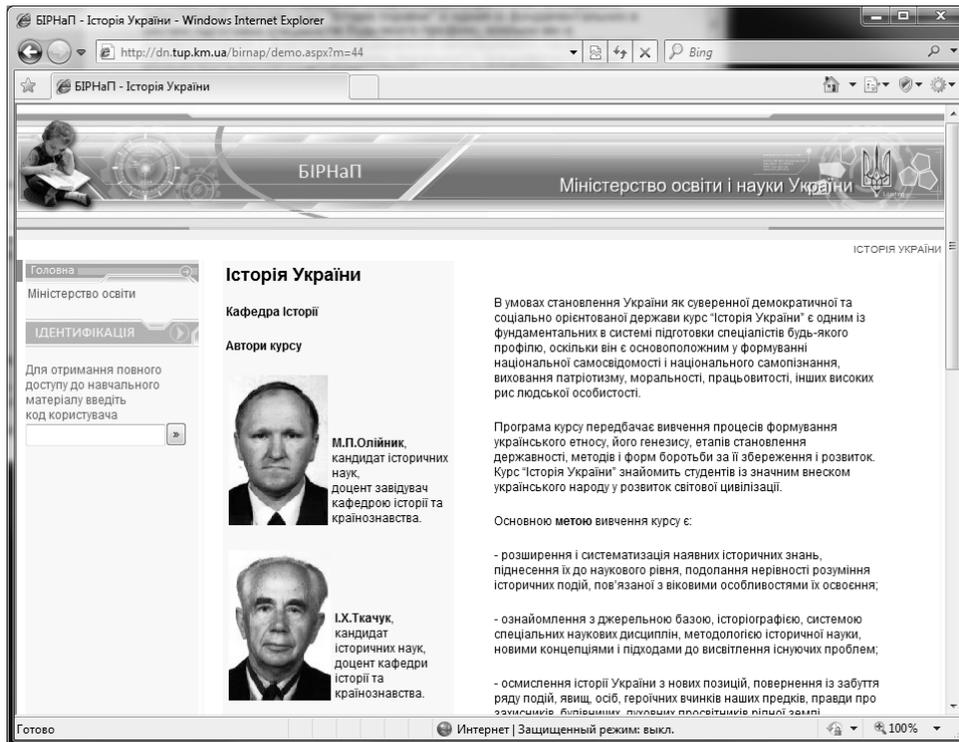


Рисунок 7 – Пример первой страницы учебного курса, но в варианте проекта МОН Украины

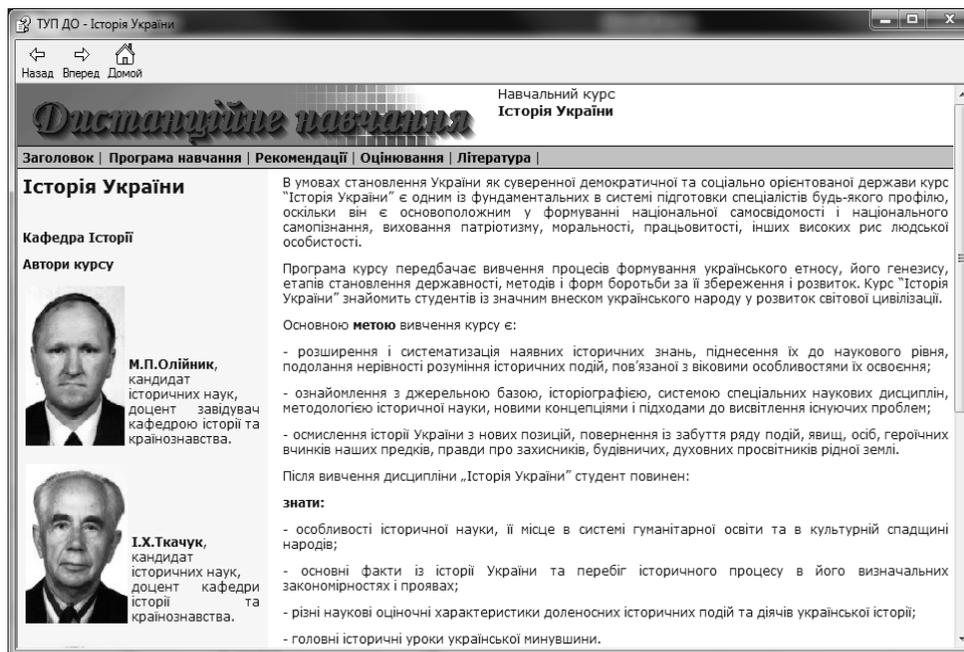


Рисунок 8 – Пример первой страницы учебного курса в формате справки (.CHM), предназначенный для публикации на CD диске

С помощью небольшой утилиты (рис. 9) можно подготовить публикации учебных курсов для CD или DVD носителей в любой комбинации: согласно учебному плану (рис.10), по произвольному списку, индивидуально по подписчику, в различных форматах и с различным дизайном. Смысл в том, что каждый подписчик получает то, что ему надо.

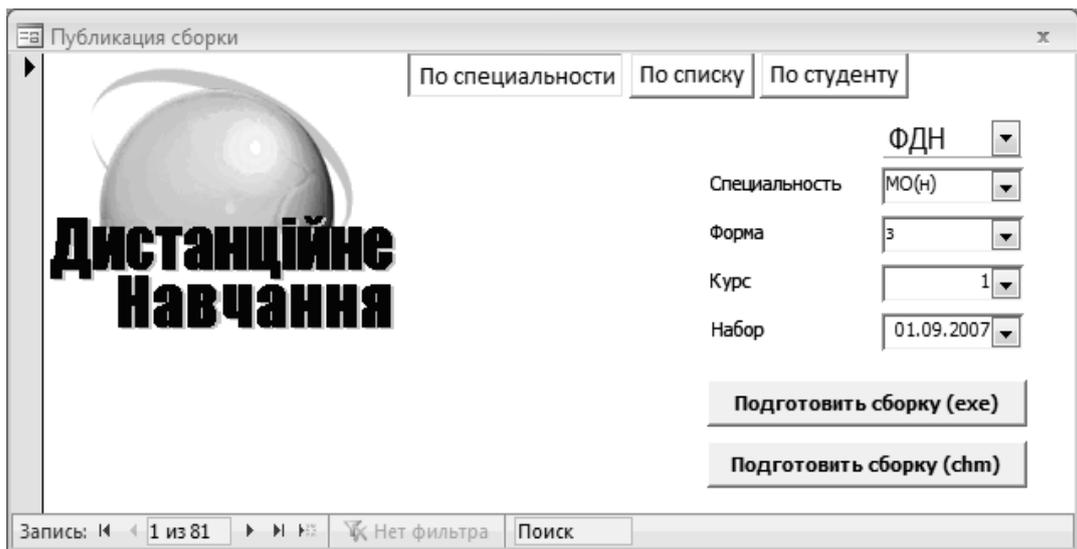


Рисунок 9 – Пример утилиты подготовки публикации «сборки» учебных курсов

Каждый год на факультете ДО готовится более 2500 дисков (столько студентов на ФДН) – каждому студенту – свой диск.



Рисунок 10 – Пример учебного курса в составе сборки

Кроме различной формы «публикации» учебного курса в него, в зависимости от обстоятельств, могут интегрироваться дополнительные составляющие. На рис.11 показано, что в учебный курс, публикуемый на сервере, интегрированы тесты тематического и итогового контроля. В дисковом варианте эта составляющая исключается. Но сборка тестов может сформироваться отдельно (рис.12), и использоваться преподавателем на компьютере, отключенном от Интернета, т.е. вид и комплектация контента зависит от способа публикации.

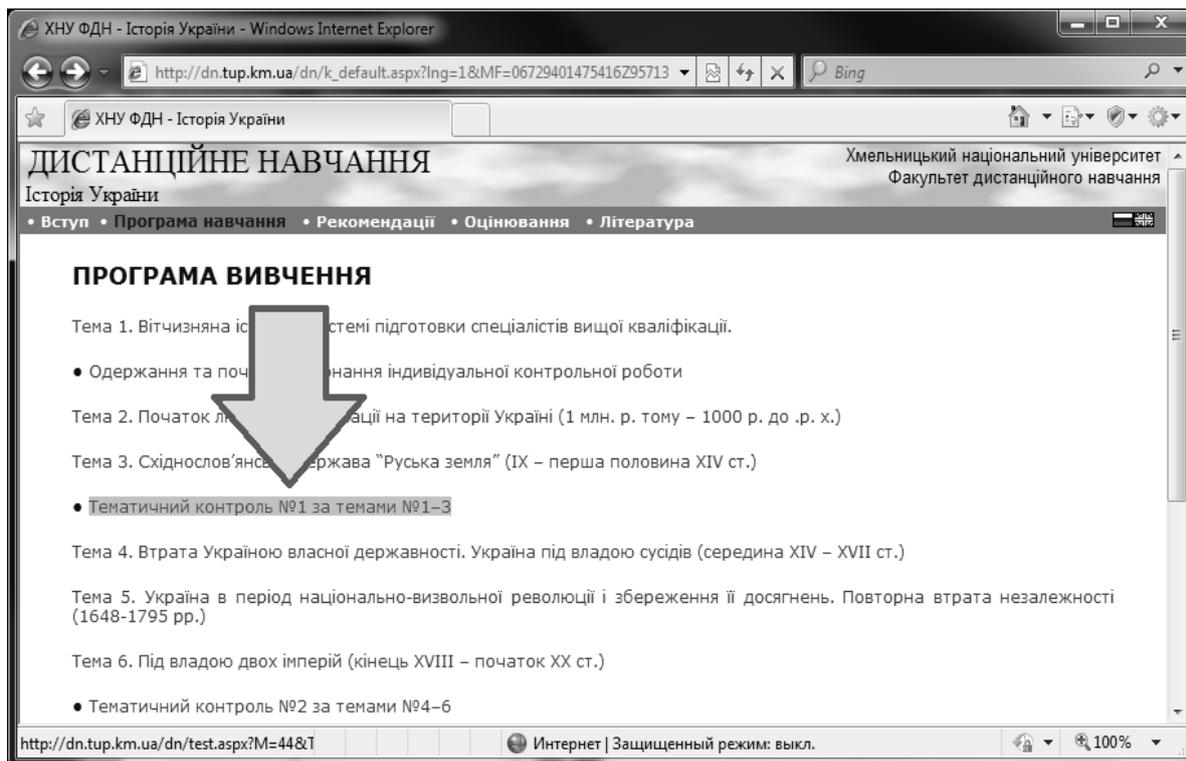


Рисунок 11 – Примерная структура учебного курса

Используя предложенный подход, мы получаем очень гибкую информационную систему, на базе которой вполне можно говорить о разработке "единой информационной среды обеспечения учебного процесса".

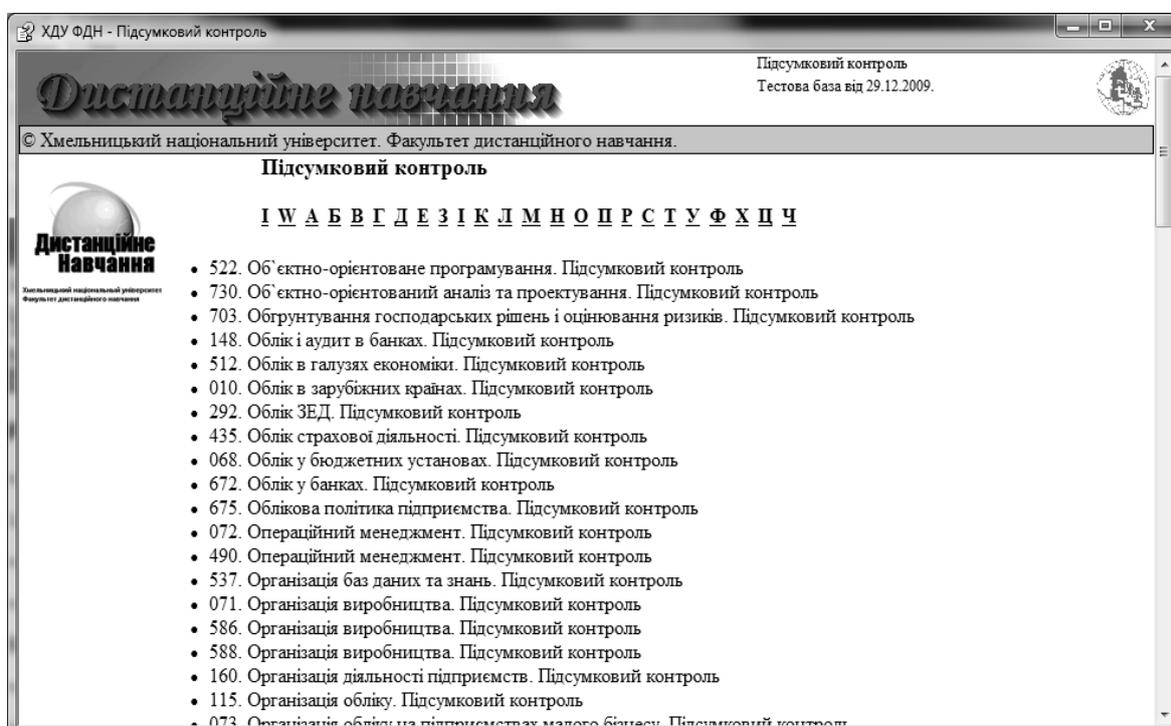


Рисунок 12 – Пример итогового контроля для сдачи тестов off-line

#### 5.4. Интеграция контента.

Благодаря новому способу организации информации, ее легко не только издавать в любом виде, но и интегрировать в другие задачи. В данном случае мы видим, как учебный материал, в строго индивидуальной дозировке, подключен к персональной странице студента (рис.13).

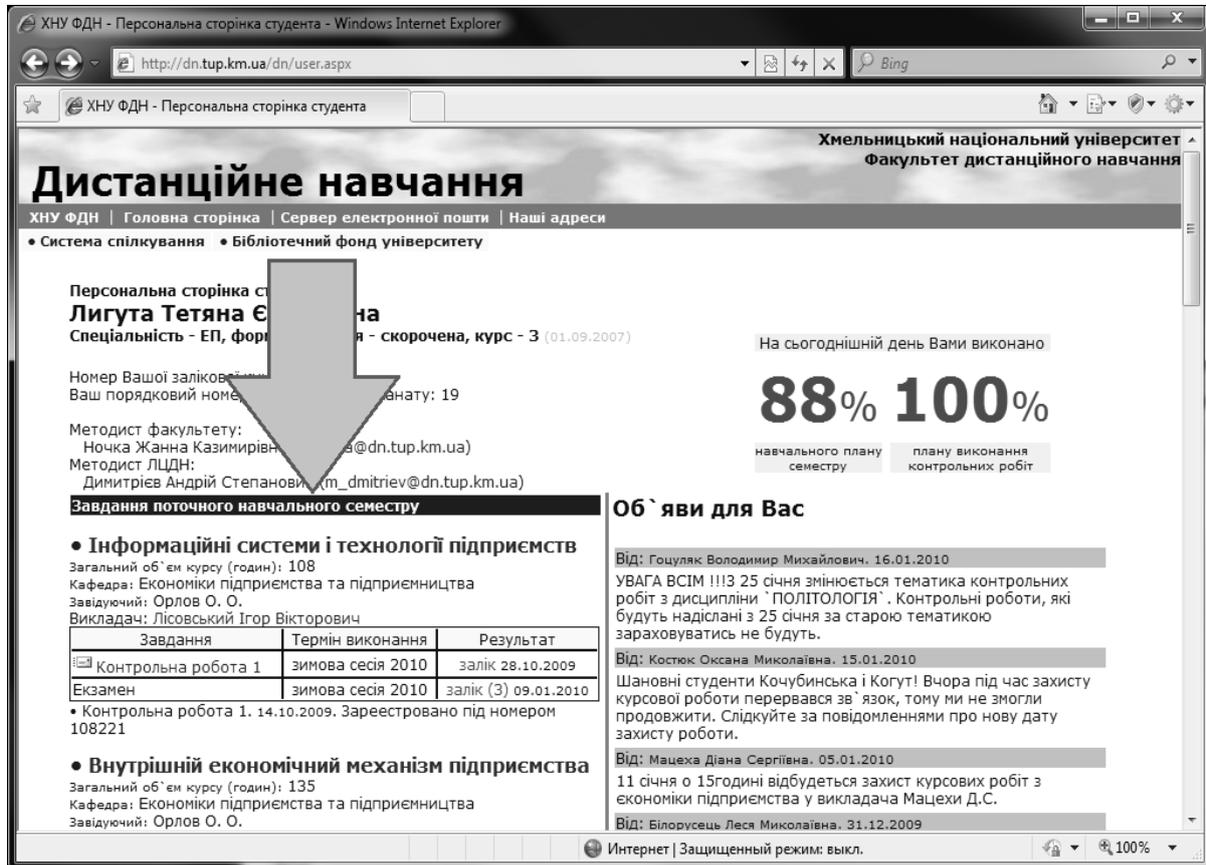


Рисунок 13 – Пример личной страницы студента

Можно не только индивидуально подходит к набору предметов обучения, но и варьировать глубину изучения каждого отдельного предмета. Используя возможности предлагаемого подхода, можно реализовать создание индивидуальной, уникальной среды обучения буквально для каждого учащегося (рис.14). Конечно, в предлагаемом проекте ДО такие возможности пока избыточны, но их реализация предусмотрена и отработана.

#### 6. Коммерческая ценность проекта.

На стадии разработки, учитывая, что технологии и программное обеспечение практически готово - особых затрат не требуется.

Прибыль. Подписки могут быть как бесплатные, так и платные. Изготовление CD, заказных комплектов сертифицированного учебного материала и т.д. – тоже может идти как за счет бюджета, так и из других источников. Наш проект – это много, но микро платежей, и главное – это реальный проект.



Рисунок 14 – Пример формирования индивидуального учебного плана

Что еще важней в плане прибыли, это то, что разрабатываемое нами направление цифровой дистрибуции решает проблему пиратства (у нас студенты друг у друга диски не копируют, нет смысла – каждый диск уникален). Попутно решается еще ряд важных проблем, таких как отслеживание целостности контента, мониторинг заказов и т.д. Оценив стоимость заявленных и реализованных приоритетов в решении данных проблем, можно прийти к однозначному выводу в огромной экономической и инновационной ценности предложенных подходов в решении одной из актуальнейших проблем постиндустриального общества.

**7. Перспективы.** Используя предложенный подход, за более чем семь лет работы со структурами данных, построенными по принципу информационного пространства, мы даже близко не подошли к пределу возможностей этих информационных конструкций. Реализация предложенного подхода для целого ряда задач (учет дорожно-транспортных происшествий для департамента ГАИ МВД Украины, унифицированная система дистанционного обучения на базе банка дистанционных курсов при МОН Украины, информационная система дистанционного обучения в Хмельницком национальном университете, и т.д.) показала его эффективность и простоту использования.

**Список использованных источников:** 1. *Баланев С.А., Бонневэй Ж., и др.* Как стать электронной компанией в России PDF Руководство – методы и бизнес-кейсы. Санкт-

Петербург, 2006. – 387 с. **2.** *Грейди Минс, Дэвид Шнайдер* Метакапитализм и революция в электронном бизнесе: какими будут компании и рынки в XXI веке/ Пер. с англ. — М.: Альпина Паблшер, 2001. — 280с. **3.** *Голоскубова Н., Клыженко Я., и др.* Интернет-магазин: организация, налогообложение, учет DJVU Фактор, 2009. – 128с. **4.** *Дик В.В., Лужецкий М.В., Родионов А.Э.* Электронная коммерция PDF Московская финансово-промышленная академия. - М. , 2005. - 376 с. **5.** *Дрик А.В., Балахничев И.Н.* Коммерческие электронные схемы PDF 1997г.- 80стр. **6.** *Денисова А.Л., Молоткова Н.В., и др.* Коммерция PDF Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2003-20 с. **7.** *Ежунинов В.В.* Электронная коммерция. Конспект лекций DOC Электронная коммерция: Учебное пособие / В. В. Ежунинов– ДУЭП, 2005. – 104 с. **8.** *Козье Д.* Электронная коммерция PDF Пер. с англ. — Москва: Издательско-торговый дом «Русская Редакция» — 288 с: ил. **9.** *Салбер А.* Как открыть интернет-магазин PDF М.: СмартБук, 2009. - 320 с. **10.** *Осадчук Е.В.* Конкурентоспособность в Интернете: как сделать свой проект успешным PDF М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. - 152 с. **11.** *Орлов А.* Технологии эффективного постинга. Учебное пособие PDF 2010г. - 71стр. **12.** *Юрасов А.В.* Электронная коммерция PDF М., Дело, 2003 - 480 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Balanev S.A., Bonnevej Zh., i dr. Kak stat' jelektronnoj kompaniej v Rossii PDF Rukovodstvo – metody i biznes-kejsy. Sankt-Peterburg, 2006. – 387 s. 2. Grejdi Minc, Djevid Shnajder Metakapitalizm i revoljucija v jelektronnom biznese: kakimi budut kompanii i rynki v XXI veke/ Per. s angl. — M.: Al'pina Pabliher, 2001. — 280s. 3. Goloskubova N., Klyzhenko Ja., i dr. Internet-magazin: organizacija, nalogooblozhenie, uchet DJVU Faktor, 2009. – 128s. 4. Dik V.V., Luzheckij M.V., Rodionov A.Je. Jelektronnaja kommercija PDF Moskovskaja finansovo-promyshlennaja akademija. - M. , 2005. - 376 s. 5. Drik A.V., Balahnichev I.N. Kommercheskie jelektronnye shemy PDF 1997g.- 80str. 6. Denisova A.L., Molotkova N.V., i dr. Kommercija PDF Tambov: Izd-vo Tamb. gos. tehn. un-ta, 2003-20 s. 7. Ezhuninov V.V. Jelektronnaja kommercija. Konspekt lekcij DOC Jelektronnaja kommercija: Uchebnoe posobie / V. V. Ezhuninov– DUJeP, 2005. – 104 s. 8. Koz'e D. Jelektronnaja kommercija PDF Per. s angl. — Moskva: Izdatel'sko-torgovyj dom «Russkaja Redakcija» — 288 s: il. 9. Salber A. Kak otkryt' internet-magazin PDF М.: SmartBuk, 2009. - 320 s. 10. Osadchuk E.V. Konkurentosposobnost' v Internete: kak sdelat' svoj proekt uspesnym PDF М.: BINOM. Laboratorija znaniij, 2008. - 152 s. 11. Orlov A. Tehnologii jeffektivnogo postinga. Uchebnoe posobie PDF 2010g. - 71str. 12. Jurasov A.V. Jelektronnaja kommercija PDF М., Delo, 2003 - 480 s.

*В.И. РОЛДУГИН*, Рига, Латвия

## **ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ КРЕДИТНЫХ МЕНЕДЖЕРОВ**

У статті розглянуті питання, пов'язані з підготовкою банківських працівників, з використанням нових підходів і сучасних технологій. Метою даної статті є пошук прихованих резервів у сфері підготовки банківських фахівців і їхнього використання для підвищення ефективності кредитування підприємств і об'єднань машинобудування. Показані автором підходи для рішення виявлених проблем можуть бути використані для розвитку дистанційного навчання Балтійської міжнародної академії в Україні.

В статье рассмотрены вопросы, связанные с подготовкой банковских работников, с использованием новых подходов и современных технологий. Целью данной статьи является поиск скрытых резервов в сфере подготовки банковских специалистов и их использования для повышения эффективности кредитования предприятий и объединений машиностроения. Демонстрируемые автором подходы для решения выявленных проблем могут быть использованы для развития дистанционного обучения Балтийской международной академии в Украине.

*V.I. ROLDUGIN*

### *PROBLEMS OF CREDIT MANAGERS REMOTE TRAINING*

In article the questions connected with preparation of bank workers, with use of new approaches and modern technologies are considered. The purpose of given clause is search of the latent reserves in sphere of preparation of bank experts and their uses for increase of efficiency of crediting of the enterprises and associations of mechanical engineering. Approaches shown by the author for the decision of the revealed problems can be used for development of remote training the Baltic international academy in Ukraine.

Дистанционное обучение должно быть ориентировано на будущую профессиональную деятельность, на применимость знаний и навыков для принятия управленческих решений. Основное преимущество дистанционного обучения заключается в возможности его проведения в любое время и в любом месте, ориентируясь на латвийский и украинский образовательные рынки.

Реализация модели дистанционного обучения на различных образовательных уровнях возможна при условии комплексного подхода, т.е. методологического, прикладного, регионального и психологического аспектов. Рассмотрим важность использования каждого из них.

Балтийская международная академия принимает активное участие в дистанционном обучении среди украинских учебных заведений. В странах Балтии востребованность заочного образования традиционно велика, но его распространение сдерживается отсутствием русскоязычного образовательного контента. Партнеры академии в Украине могут способствовать адаптации предлагаемых дисциплин к особенностям своего образовательного рынка и профессиональных аудиторий.

Для успешного развития коммерческого банка, укрепления его позиций на рынке банковских услуг и повышения конкурентоспособности необходимо осуществлять деятельность по обучению и повышению квалификации сотрудников. Кредитным учреждениям приходится адаптироваться к изменениям внешней среды, что требует внесения своевременных корректив своей деятельности и обеспечения рабочих мест квалифицированными специалистами.

Возможности современных технологий позволяют разрабатывать специальные теоретические подходы к применению современных методов представления знаний и передачи информации в условиях интернационализации банковского бизнеса. Наш опыт показывает, что дистанционная подготовка банковских специалистов может быть развернута на базе новых технологий, которые направлены на реализацию конкретных моделей обучения.

Так, методологический аспект связан с разработкой программы обучения, основных принципов организационных форм, критериев оценки, форм самостоятельной работы обучающихся, а также с системой контроля и коррекции деятельности обучающихся преподавателем.

Прикладной аспект ориентирует процесс обучения на профессиональную деятельность, на приобретение навыков, на совершенствование методики дополнительными информационными ресурсами. Не менее важен региональный аспект, который определяет возможность использования данной модели для подготовки специалистов за границей с учетом местных и национальных особенностей.

Психологический аспект связан с изучением процессов и закономерностей обучающей деятельности педагогов и учебной работы обучающихся в условиях дистанционного обучения, построенной с учетом потребностей, интересов, направленности, мотивов, уровней обученности и т.д.

Применение комплексного подхода позволяет обеспечить взаимосвязь различных аспектов при разработке реальной модели системы обучения, а на уровне концептуального положения – предусмотреть возмож-

ности дальнейшего развития дистанционного обучения вуза, совершенствования составных компонентов на основе определения их связей и зависимостей, установления степеней влияния и значимости.

Важным фактором эффективности дистанционного обучения является корректировка учебных программ по экономическим дисциплинам, которые должны быть ориентированы на спрос со стороны действующих кредитных и финансовых учреждений. Например, на такие дисциплины, как: кредитование промышленных предприятий, кредитный менеджмент, международные расчеты за товарно-материальные ценности и услуги.

Так, обучение по программе кредитования объединений и предприятий машиностроения предполагает: во-первых, изучение студентом порядка и методов кредитования, во-вторых, разъяснение преподавателем операций по оформлению и выдаче ссуд промышленным предприятиям, в-третьих, организацию контроля степени усвоения изложенного материала, в-четвертых, выполнение студентом отдельных операций по кредитованию инновационных мероприятий под контролем преподавателя и комментарии последнего.

При изучении порядка и методов кредитования следует акцентировать внимание на то, что в банковской практике используются два метода кредитования: остаточный и оборотно-сальдовый. Выбор более приемлемого метода для кредитования оборотных средств связан с их кругооборотом: наличность > кредиторская задолженность > производственные запасы > незавершенное производство > готовая продукция > реализация > дебиторская задолженность > наличность.

В отличие от сезонного кредитования, обязательства по возврату ссуд погашаются после одного цикла воспроизводства. У нормально работающего предприятия отдельные кругообороты фондов как бы постоянно перекрывают друг друга. Проблемы при кредитовании заключаются в своеобразном параллельном движении производственных фондов (в натуральном выражении) и их стоимостном выражении. Стоимостное выражение активов промышленного предприятия является объектом кредитования. Движение активов происходит неравномерно и не совпадает во времени, что нередко приводит к значительным колебаниям обеспечения кредита от заранее планируемых сумм.

Поэтому, прежде чем заключить кредитный контракт, должен делаться тщательный кредитный анализ заемщика. Кредитный работник должен тщательно анализировать заемщика, определять риски и отражать их в докладе, обсуждаемом на кредитном комитете банка.

Доклад об условиях кредитования предприятия, обсуждаемый на кредитном комитете, должен содержать предложения о:

- 1) выводы о надежности клиента и доходности его операций;
- 2) лимитах кредитования;
- 3) сроках кредитования и расписании платежей;
- 4) величине процентной ставки (дисконте);
- 5) структуре обеспечения кредита, принимаемого банком в залог, а также аргументах, подтверждающих возможность погашения кредита в предлагаемые сроки;
- 6) информации, которую необходимо получать от заемщика, и определении условий, при которых кредит должен быть возвращен досрочно;
- 7) плане действий на случай возникновения у клиента финансовых затруднений.

Для этого кредитному работнику необходимо дать ответы на следующие вопросы:

- 1) Каков набор производимых продуктов и рисков, связанных с их реализацией?
- 2) Какие характеристики сырья и надежны ли сроки его поставки?
- 3) В чем особенность технологического процесса кредитуемого предприятия и насколько эластичен спрос на производимую им продукцию?
- 4) Насколько конкурентоспособна отрасль машиностроения, в которой работает предприятие?
- 5) Учитываются ли экологические вопросы в процессе производства и реализации продукции?
- 6) Каково качество менеджмента на данном предприятии? При оценке качества менеджмента, важен возраст руководителей и предыдущий опыт работы. Как работали предприятия, которыми они руководили ранее? Компетентны ли руководители в научной сфере, связанной с их практической деятельностью? Какой долей капитала они владеют в уставном фонде предприятия? Но наиболее важна их честность и порядочность.

В результате обучения по данной программе студенты должны овладеть знаниями и навыками в области кредитования промышленности. В процессе обучения они должны выполнить практическое задание с подготовкой и рассмотрением документов для кредитования предприятия. Такое задание должно включать: рассмотрение заявки на кредит, интервью с заемщиком, подготовку перечня документов для предприятия о возможности выдачи кредита, исходя из доходов, получение информации о заемщике и его поручителях, изложение условий кредитования, а также оформление кредитного договора и принципы мониторинга предоставленного кредита.

Специалисты кредитного отдела должны обеспечивать контролируемость заемщика. Кредитемое предприятие контролируется, если при оформлении кредита обеспечены следующие условия:

1) никакая другая компания не должна иметь первоочередного права требования заложенного имущества, если такое право не оформлено на день выдачи кредита;

2) необходимо правильно определить стоимость залога и установить правильное соотношение между выданным кредитом к имеющемуся у заемщика залогу;

3) должен быть обеспечен контроль за состоянием и движением заложенного имущества: знание в любой момент реальной стоимости залога и его местонахождения. Наблюдение за использованием кредита необходимо для того, чтобы выявить на ранней стадии нецелевое использование кредита. Для этого работниками банка проводятся проверки по данным бухгалтерского и складского учета.

В процессе обучения должны использоваться деловые игры. Использование специальных компьютерных программ позволяет обучить основным навыкам, необходимым кредитным работникам. В процессе обучения особое внимание следует уделить особенностям кредитования промышленных предприятия в условиях финансового кризиса. Будущие кредитные работники должны реально представлять свои действия после возникновения признаков проблемного кредита.

После предоставления кредита банк тщательно ведет контроль за его использованием. Если появляются первые признаки проблемности кредита финансового или нефинансового характера, кредитные работники:

1) консультируются с работниками отдела, который занимается проблемными кредитами (если таковой имеется);

2) подготавливают справку руководству, в которой отражают необходимость перевести кредит в более низкую квалификацию;

3) изучают возможность получения дополнительного обеспечения;

4) разрабатывают план корректирующих мер;

5) следят за операциями на расчетном счете заемщика.

Если таковой счет ведется банком-кредитором, это может помочь контролю и прояснить, каким образом предприятие тратит средства. Изучение движения средств по основному счету может подсказать момент не-

обходимости применения санкций к заемщику. Сигналом для этого может послужить перевод поставщиками предприятия на расчеты только на условиях предварительной оплаты.

После возникновения у предприятия серьезных финансовых проблем, кредитный работник:

- 1) изучает документы, сопровождающие течение конфликта;
- 2) проверяет не пропущен ли установленный законом срок подачи претензии и иска;
- 3) пролонгирует кредит в качестве краткосрочной стратегии;
- 4) требует от заемщика план-стратегию выхода из кризиса (по сокращению расходов и увеличению доходов);
- 5) проверяет каково качество документации по залогу;
- 6) анализирует имеет ли он право претензий против третьей стороны (например, гаранта);
- 7) ищет возможность разрыва отношений с заемщиком;
- 8) пытается продать ссуду со скидкой и выйти из дела;
- 9) передает обслуживание кредита по контракту другим финансовым учреждениям;
- 10) совместно с руководством компании выявляет проблемы и пытается их решить.

Построение реально действующей системы дистанционного образования должно включать активное применение телекоммуникационных сетей различного уровня, а также проводить обучение в нескольких режимах: в виртуальных аудиториях, интерактивное обучение под руководством преподавателя, организацию практических занятий и сдачу экзаменов через Интернет.

Преподаватель может загрузить учебные виртуальные материалы с помощью Web-браузера, а затем общаться со студентами посредством аудиосвязи, в чате или через электронную почту. Обновление материалов учебного курса должно происходить в режиме реального времени, а в случае необходимости могут проводиться видеоконференции. Оценка знаний студента осуществляется путем экзаменационного тестирования.

Конкретные вопросы организации дистанционного обучения должны решаться в центрах дистанционного обучения, которые следует создавать в образовательных структурах, имеющих достаточное финансирование. Бал-

тийская международная академия обладает финансовыми ресурсами в рамках европейских общеобразовательных фондов (ERASMUS, TEMPUS и др.).

Практика дистанционного обучения убеждает в том, что целесообразно создавать центры в вузах, так как упомянутые выше проблемы могут быть решены лишь в тесном взаимодействии между специалистами в банковском деле и преподавателями, занимающимися вопросами методологии педагогического процесса.

Несмотря на то, что дистанционное обучение является перспективным направлением профессионального образования, его внедрению в банковской сфере препятствует ряд организационных проблем. Основные из них связаны с разработкой учебных программ и требуемого времени для ее усвоения.

Применение технологий дистанционного обучения требует немалых расходов, в частности: приобретение видео и аудио аппаратуры; привлечение к учебному процессу высококвалифицированных специалистов, владеющих инновационными технологиями банковского менеджмента. Поэтому только применение комплексного подхода позволяет обеспечить эффективность и взаимосвязь различных компонентов при разработке системы дистанционного обучения, а также определить потенциальные возможности развития дистанционного обучения вуза.

**Список использованных источников:** 1. Дистанционное обучение: Учебное пособие / Под ред. Е.С. Полат. - М.: Гуманит. изд. центр "Владос", 1998. 2. *Монахов В.М.* Технологические основы проектирования и конструирования учебного процесса.-Волгоград: Перемена, 1995. 3. *Скибицкий Э.Г.* Дидактическое обеспечение процесса дистанционного обучения. Дистанционное образование № 1, 2000. 4. *Шабанов, А.Г.* Моделирование процесса дистанционного обучения в системе непрерывного образования: автореф. дисс. д.п.н. / А.Г. Шабанов. – Барнаул, 2004.

**Bibliography (transliterated):** 1. Distancionnoe obuchenie: Uchebnoe posobie / Pod red. E.S. Polat. - M.: Gumanit. izd. centr "Vlados", 1998. 2. Monahov V.M. Tehnologicheskie osnovy proektirovanija i konstruirovaniija uchebnogo processa.-Volgograd: Peremena, 1995. 3. Skibickij Je.G. Didakticheskoe obespechenie processa distancionnogo obuchenija. Distancionnoe obrazovanie № 1, 2000. 4. Shabanov, A.G. Modelirovanie processa distancionnogo obuchenija v sisteme nepreryvnogo obrazovanija: avtoref. diss. d.p.n. / A.G. Shabanov. – Barnaul, 2004.

**А.Л. СТАНОВСКИЙ**, д-р техн. наук, **Ю.С. БАРЧАНОВА**,  
**Ю.В. ШИХИРЕВА**, Одесса, Украина

## **ФОРМАЛИЗАЦИЯ НЕЧЕТКИХ ПОНЯТИЙ ДЛЯ СИСТЕМ ОБРАБОТКИ СТИХОТВОРНОГО ТЕКСТА**

Запропоновано деякі концепції комп'ютерної підтримки автоматизованого обробника віршованого тексту. Формалізовано основні атрибути віршованого тексту – риму та ритм. Розроблено алгоритм автоматизованого підбирання слів, що римуються. Запропонована електронна база даних (словник) мови, в якій впорядкованість тай добір слів виконуються, починаючи з останньої букви слова.

Предложены некоторые концепции компьютерной поддержки автоматизированного обработчика стихотворного текста. Формализованы основные атрибуты стихотворного текста – рифма и ритм. Разработан алгоритм автоматизированной подборки слов, которые рифмуются. Предложена электронная база данных (словарь) языка, в которой упорядочивание и подбор слов выполняются, начиная с последней буквы слова.

*A.L. STANOVSKY, YU.S. BARCHANOVA, YU.V. SHICHIREVA*  
*FORMALIZATION OF INDISTINCT CONCEPTS FOR SYSTEMS OF THE POETIC TEXT*  
*PROCESSING*

Some concepts of computer support of the automated translator of the poetic text are offered. The basic attributes of the poetic text – a rhyme and a rhythm are formalized. The algorithm of the automated selection of rhymed words is developed. The electronic database (dictionary) of language in which ordering and selection of words are carried out, since last letter of a word is offered.

Стихотворный текст отличают, как правило, рифма, ритм, смысл, образность и новизна. Отметим, что при обработке такого текста (создании, переводе и т.п.) «обслуживание» последних трех атрибутов остаются за автором – человеком, и только первые два могут быть в необходимой степени формализованы. Для этого необходимо разработать новую, концептуальную, восходящую исключительно к проблемам информатики, основу системы обработки, так как, например, обычные переводчики оставляют «за кадром» те особенности текста, без которых не обходится стихотворная речь [1, 2].

Поэтому целью настоящей работы являлась разработка *информационной основы* системы обработки стихотворного текста (СОСТ), позволяющей в автоматизированном режиме подбирать необходимые элементы (слова, словосочетания).

Основной задачей в рамках этой цели явилась попытка формализации важнейшего атрибута стихотворного текста, которым в большинстве случаев является *рифма*. К сожалению, это понятие недостаточно определено в области информатики и не имеет в ней четкого смысла [3].

Для достижения цели художественное стихотворное произведение рассматривается с двух сторон – творческой и технической (информационной). Хотя такое разделение в значительной степени условно, оно приводит к неплохим результатам в качестве поддержки творчества в таких сугубо «человеческих» областях деятельности, как сочинение музыки, игра в шахматы и многое другое.

Рифма (греч. «*rhythmos*» – стройность, соразмерность) – созвучие концов стихотворных строк, создающее ощущение их единства и родства; регулярный звуковой повтор, несущий организационную функцию в метрической, строфической и смысловой композиции стихотворного произведения; один из основных элементов художественного стиля в системе выразительных средств поэзии; важнейший приём инструментовки стиха.

Первое слово в рифме – пассивное, второе – активное. Пассивное слово, идущее во временном отрезке первым, вносит в стих момент незавершённости, оставляя после себя напряжение, связанное с ожиданием гармоничной развязки. Это напряжение снимает активное слово, которое своим появлением заставляет вспомнить пассивное, и уже вместе они создают то ощущение законченности, гармонии и родства, которое и называется рифмой.

Таким образом, вся нагрузка в рифме лежит именно на втором слове, которое может оправдать (точная рифма), частично оправдать (приблизительная рифма) или не оправдать вовсе (диссонанс, белый стих) ожидание гармоничной развязки, созданное пассивным словом. Оправданное ожидание всегда усиливает эмоциональное воздействие стиха и заложено в самой природе поэзии.

Рифмы в русском языке классифицируются по происхождению, объёму (количеству слогов), звучанию и родственными отношениям, ощущению, положению в стихе и в строфе, а также по дополнительным признакам [4]. Кроме того, выделяют 103 вида рифмы, а также множество ее типов и родов (рис. 1) [5].

Перечисленные *качественные* характеристики рифмы не позволяют к сожалению сравнивать рифмы *количественно*. Поэтому была предложена классификация, направленная на использование в информационных системах.

В основу формализации понятия «рифма» положены следующие концепции (примеры приведены из стихотворений одного из авторов статьи).

В рифме участвуют два слова. СОСТ вычисляет коэффициент близости этих слов  $P$  – комплексное число, состоящее из двух частей – четкой и нечеткой.

Четкая часть  $C$  – суть количественная оценка меры полного совпадения букв из 42-буквенного алфавита (33 основных буквы + 9 ударных гласных) в словах рифмы на соответствующих местах, вычисленная по формуле:

$$C = \sum_{i=1}^L w_i p_i, \quad (1)$$

где  $i$  – номер позиции сравниваемой буквы, отсчитанный с конца слова;  $L$  – длина рифмы;  $p$  – наличие совпадения (1 – есть; 0 – нет);  $w_i$  – весовые коэффициенты, возрастающие по мере роста  $i$ .

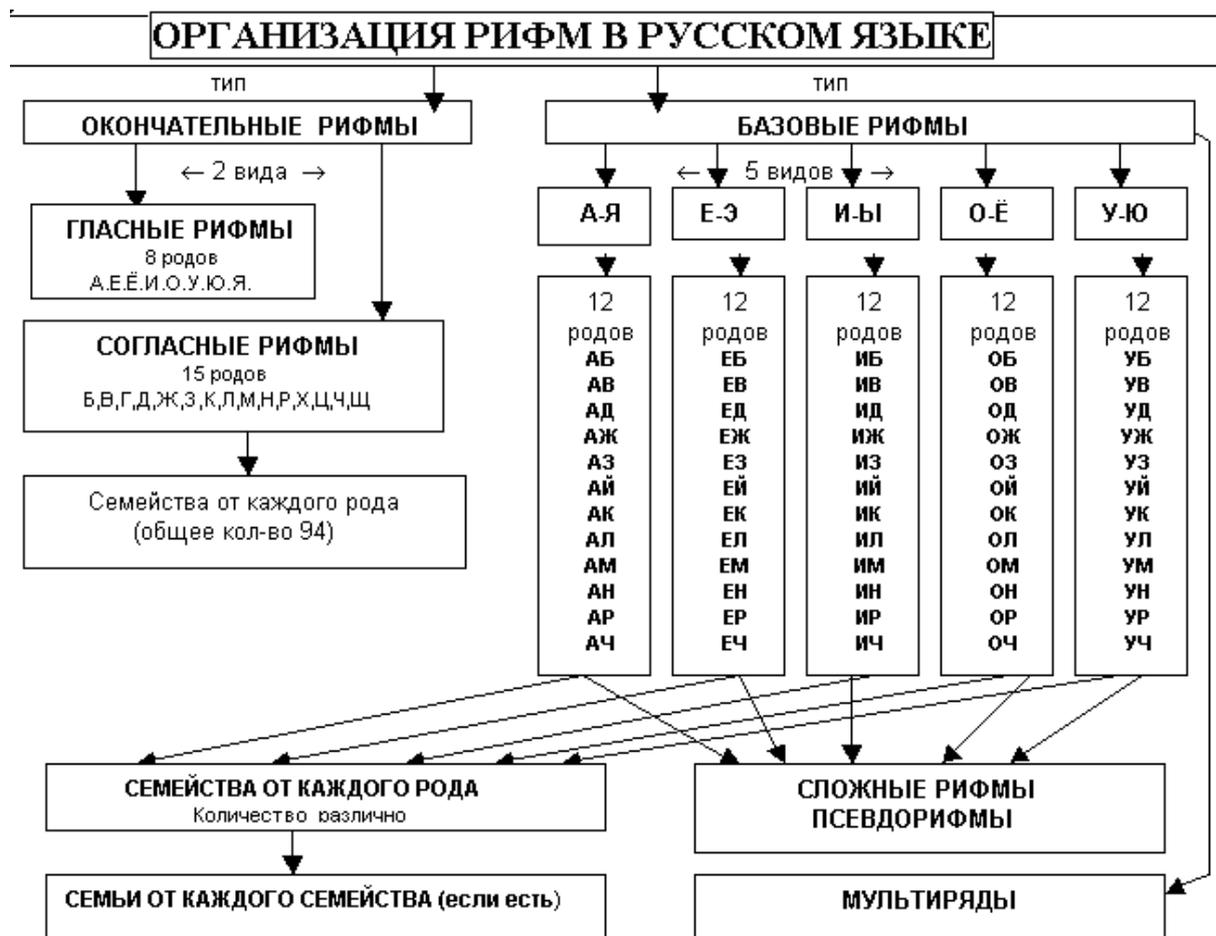


Рисунок 1 – Классификация рифм в русском языке по типам и родам

Например, рифма «художник – придорожных» при длине в шесть букв ( $L = 6$ ) содержит совпадение букв «ожн», стоящих на позициях 3 – 5 с конца. Именно они участвуют в расчетах четкой части силы рифмы. Остальные буквы рифмы, стоящие на позициях 1, 2 и 6, не вносят вклад в величину  $\mathcal{C}$  ( $w_1 = w_2 = w_6 = 0$ ) принимаются во внимание при расчете нечеткой части.

Нечеткая часть  $H$  – суть количественная оценка с помощью теории нечетких отношений меры близости несовпадающих букв из 42-буквенного алфавита в словах рифмы на соответствующих местах [7].

Коэффициент близости  $P$ , как и обычное комплексное число, может рассматриваться как векторная сумма  $\mathbf{P}$  четкого и нечеткого векторов  $\mathbf{P} = \mathbf{C} + \mathbf{H}$  и рассчитываться по правилу скаляра:

$$P = |\mathbf{C}| \cdot |\mathbf{H}| \cdot \cos \angle \mathbf{C}, \hat{\mathbf{H}} . \quad (2)$$

К настройкам пользователя (НП) относится длина рифмы  $L$ .

Длина рифмы может быть определена «вручную» – прямым усмотрением (например, длина рифмы «и Тань я – скитанья» может быть оценена специалистом в шесть букв) или вычислена автоматически с учетом объединения и опускания согласных одним из следующих методов (рис. 2).

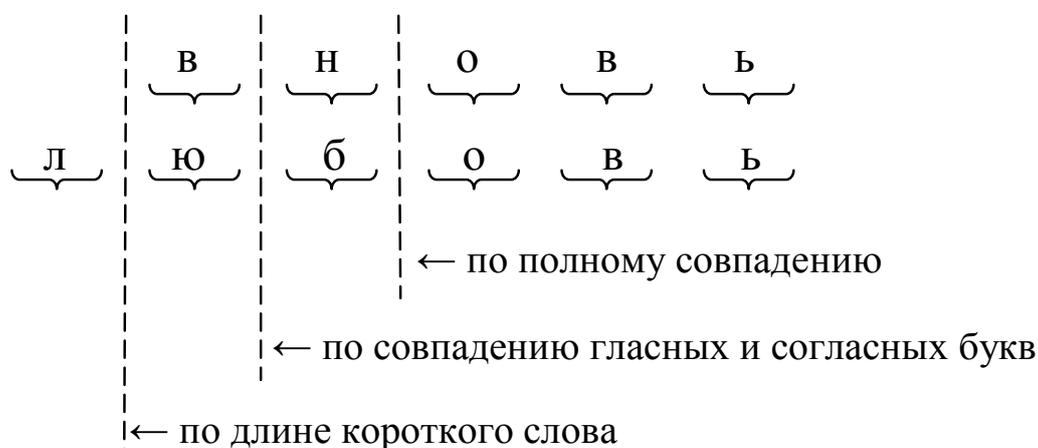


Рисунок 2 – Схема, иллюстрирующая методы определения длины рифмы

В соответствии с рис. 2 длина рифмы «вновь – любовь» равна трем буквам при использовании метода полного совпадения, четырем – метода совпадения гласных и согласных букв и пяти – метода определения по длине короткого слова.

В базе данных СОСТ хранятся:

– слова русского языка во всех склонениях, спряжениях и числах, составленные в 42-буквенном алфавите; система управления этой базой данных, была построена таким образом, чтобы она позволяла пользователю

подбирать слова не по первым буквам алфавита, как в обычных словарях, а по последним – необходимый атрибут при подборе соответствующих рифм;

– известные (применявшиеся в опубликованных стихотворениях) рифмы с указанием их длины, силы, новизны и неловкости.

Блок-схема алгоритма поиска второго слова рифмы из  $M$  слов в БД представлена на рис. 3.

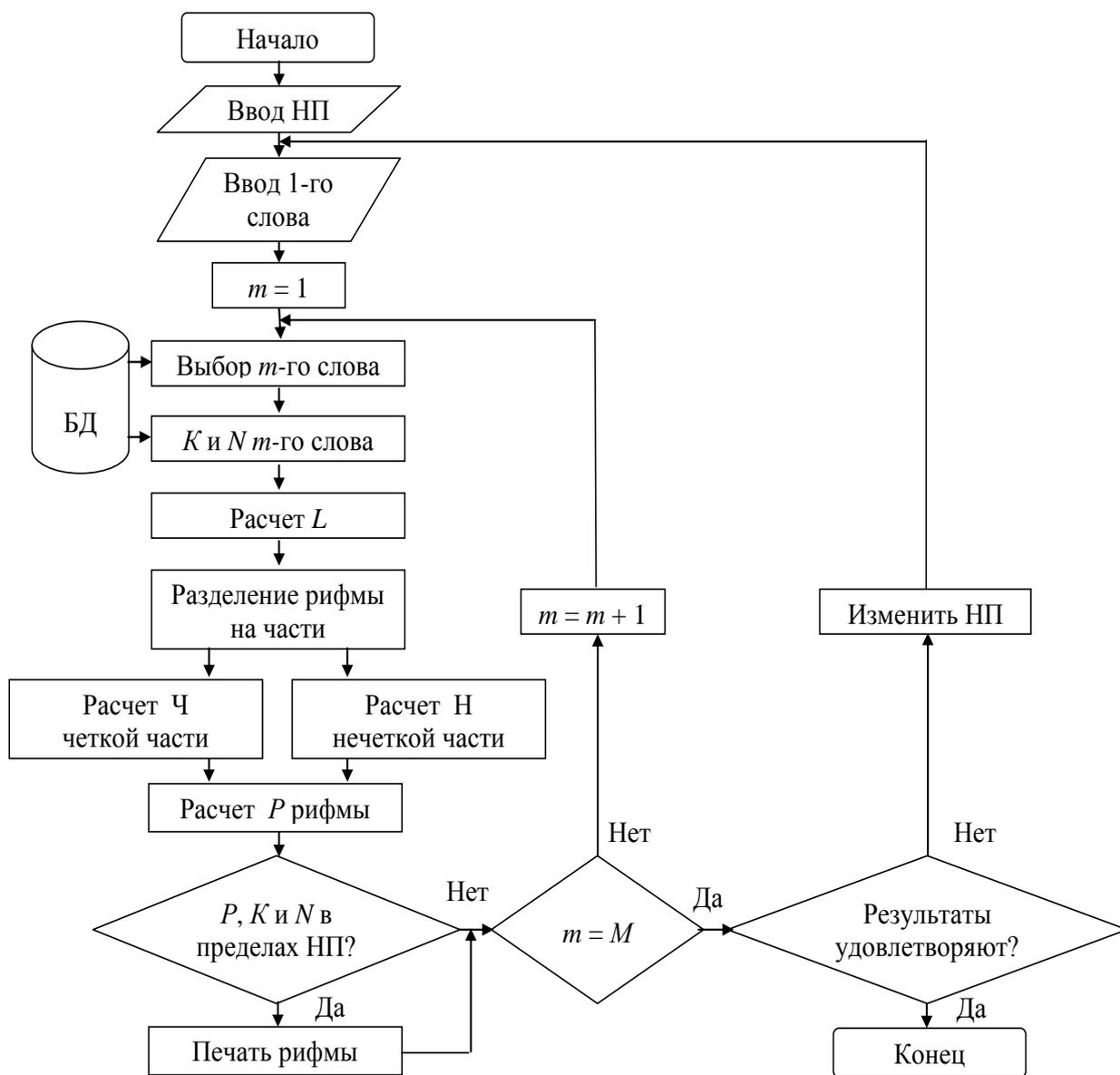


Рисунок 3 – Блок-схема алгоритма подбора вторых слов рифмы в пределах настроек пользователя

Практическое использование созданной СОСТ показало хорошие результаты, позволившие рекомендовать систему для применения ее при

«ручном» и полуавтоматическом (с предварительным использованием подстрочника) переводе стихотворений, а также для подбора рифм при стихосложении.

**Список использованных источников:** 1. *Шаляпина З.М.* Автоматический перевод: эволюция и современные тенденции // Вопросы языкознания. – 1996. – № 2. – С. 105 – 117. 2. *Лозинский М.А.* Искусство стихотворного перевода // Перевод – средство взаимного сближения народов. Сборник статей. – М.: Прогресс, 1987. – С. 23 – 33. 3. *Становский А.Л.* Концептуальная основа автоматизированного переводчика стихотворного текста / *А.Л. Становский, Е.А. Науменко, А.Н. Панченко* // Материалы XIV конференции «Моделирование в прикладных научных исследованиях». – Одесса: ОНПУ, 2007. – С. 78. 4. *Онуфриев В.В.* Словарь разновидностей рифмы. – Русские рифмы. – С. 1 [электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://rifma.com.ru/Theory-0.htm>. 5. *Онуфриев В.В.* Словарь разновидностей рифмы. – Русские рифмы. – С. 9 [электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://rifma.com.ru/SLRZ-09.htm>. 6. *Раскин Л.Г.* Нечеткая математика. Основы теории. Приложения / *Л.Г. Раскин, О.В. Серая*. – Харьков: Парус, 2008. – 352 с. 7. *Клименко И.* Сколько слов в русском языке. – Русская грамота [электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.igroslov.ru/index.php?option=com\\_content&task=view&id=37&Itemid=25](http://www.igroslov.ru/index.php?option=com_content&task=view&id=37&Itemid=25).

**Bibliography (transliterated):** 1. Shal'japina Z.M. Avtomaticheskij perevod: jevoljucija i sovremennye tendencii // Voprosy jazykoznanija. – 1996. – № 2. – S. 105 – 117. 2. Lozinskij M.A. Iskusstvo stihotvornogo perevoda // Perevod – sredstvo vzaimnogo sbližhenija narodov. Sbornik statej. – M.: Progress, 1987. – S. 23 – 33. 3. Stanovskij A.L. Konceptual'naja osnova avtomatizirovannogo perevodchika stihotvornogo teksta / A.L. Stanovskij, E.A. Naumenko, A.N. Panchenko // Materialy XIV konferencii «Modelirovanie v prikladnyh nauchnyh issledovanijah». – Odessa: ONPU, 2007. – S. 78. 4. Onufriev V.V. Slovar' raznovidnostej rifmy. – Russkie rifmy. – S. 1 [jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <http://rifma.com.ru/Theory-0.htm>. 5. Onufriev V.V. Slovar' raznovidnostej rifmy. – Russkie rifmy. – S. 9 [jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <http://rifma.com.ru/SLRZ-09.htm>. 6. Raskin L.G. Nechetkaja matematika. Osnovy teo-rii. Prilozhenija / L.G. Raskin, O.V. Seraja. – Har'kov: Parus, 2008. – 352 s. 7. Klīmenko I. Skol'ko slov v russkom jazyke. – Russkaja gramota [jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: [http://www.igroslov.ru/index.php?option=com\\_content&task=view&id=37&Itemid=25](http://www.igroslov.ru/index.php?option=com_content&task=view&id=37&Itemid=25).

**Є.О. ЯКОВЕНКО**, Херсон, Україна,  
**В.М ГОГУНСЬКИЙ**, д-р техн. наук, Одеса, Україна,  
**О.Є. ЯКОВЕНКО**, канд. техн. наук, Херсон, Україна

## **СТАНДАРТИЗАЦІЯ СХОВИЩ ЗНАНЬ У СИСТЕМАХ УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ ОРГАНІЗАЦІЙНИХ ЗНАНЬ (СЗ СУЯОЗ)**

Деталізовано завдання, які вирішують сховища знань у системах управління якістю організаційних знань (СЗ СУЯОЗ). Запропоновано архітектуру СУЯОЗ та загальну схему налагодження та доступу до даних та знань порталу.

Детализированно задания, которые решают хранилища знаний в системах управления качеством организационных знаний (ХЗ СУКОЗ). Предложена архитектура СУКОЗ и общая схема налаживания и доступа к данным и знаниям портала.

*E.O. JAKOVENKO, V.M GOGUNS'KIJ, O.E. JAKOVENKO*  
*STANDARDIZATION OF STOREHOUSES OF KNOWLEDGE IN CONTROL SYSTEMS OF*  
*QUALITY OF ORGANIZATIONAL KNOWLEDGE*

Tasks were detailed. They solve the repositories of knowledge's in the management quality systems of organizational knowledge's (DK COKQS). Architecture of COKQS and general adjusting scheme and access to data and knowledge's of portal were offered.

Чим більше накопичується інформації, тим складніше стає зберігати її на паперових носіях або запам'ятовувати. Паперові документи мають обмежений доступ, і їх важко змінювати. А якщо з організації звільняється висококваліфікований фахівець, втрата цінних знань і досвіду часто виявляється для організації непоправною. Тому організаційні системи (ОРС) зараз переходять до використання сховищ даних, щоб всі співробітники могли використовувати накопичену інформацію, вносити при необхідності зміни, архівувати дані і т.д.

СЗ СУЯОЗ відрізняються від традиційних баз даних (БД) тим, що вони проектуються для підтримки процесів ухвалення рішень, а не просто для ефективного збору і обробки даних. Як правило СЗ СУЯОЗ містить багаторічні версії звичайної БД, що фізично розміщуються в тій же самій базі. Дані в СЗ СУЯОЗ не оновлюються на підставі окремих запитів користувачів. Натомість вся база даних періодично оновлюється цілком.

СЗ СУЯОЗ грає роль єдиного інформаційного середовища для побудови стійкої системи комунікацій між різними групами користувачів в освіті.

Деталізуємо завдання, які вирішують СЗ СУЯОЗ:

– уявлення і зберігання знань на базі вибраної формальної моделі;

- обмін знаннями між користувачами або групами дослідників при розгортанні системи в глобальній мережі;
- накопичення і передача внутрішніх знань організації при розгортанні системи локально;
- підвищення ефективності використання знань;
- запобігання втраті знань при зміні поколінь користувачів або початку трудової діяльності;
- підтримка версійності знань;
- економія часу при підготовці користувачів з слабкою кваліфікацією.

З урахуванням того, що СЗ СУЯОЗ підтримує можливість роботи в мережі Інтернет, вона представляє собою гіпертекстове середовище, що містить знання, які можуть використовувати різні користувачі. Пропонується реалізувати СЗ СУЯОЗ в технології *Wiki*, яка є ідеальною основою для *on-line* інженерії знань.

*Wiki* дозволяє своїм користувачам максимально оперативно ділитися новими знаннями, надаючи для цього зручний інтерфейс. Буквально в один клік можна додати нову інформацію, яка відразу буде доступна решті всіх користувачів *wiki-порталу*. Одна з основних переваг *wiki* – можливість створювати, редагувати і видаляти «що завгодно, кому завгодно і коли завгодно».

При цьому понятійні знання зберігаються в схемі БД, процедурні знання у формах, декларативні знання в СУБД. Створення СУЯОЗ з сховищами знань здійснюється засобами двох дизайнерів: дизайнера форм (екранних форм для введення і відображення даних), засобами якого описуються як структури даних, так і процедури обробки, і дизайнера звітів (форм виведення даних), який також містить засоби опису процедур обробки, необхідні для формування звітів.

З урахуванням вищезазначеного пропонується архітектура СУЯОЗ (рис.1).

Дизайнери форм вхідних і вихідних документів поміщають їх в сховищі форм. Система Адміністратор дозволяє створювати СУЯОЗ за вказаними вхідними і вихідними формами, визначає користувачів і їх права. Редактор документів служить для введення, пошуку і перегляду документів. Дані зберігаються в БД.

СУЯОЗ створюється автоматично за формами вхідних і вихідних документів. Породжується мінімальна схема БД, що містить всі об'єкти і реквізити вхідних форм. Створюється індекс за всіма (за умовчанням) реквізитами всіх об'єктів. Система готова для введення і відображення даних за будь-яким нерегламентованим запитом кінцевого користувача, а також для друку вихідних документів. Технологія дозволяє створювати за будь-яким фрагментом БД інформаційні ресурси, які відторгаються на зовнішні носії



Налагодження порталу на область знань здійснюється за допомогою редактора онтології, який дозволяє створювати, редагувати і видаляти будь-які елементи онтології (класи понять, відносини, домени), а також задавати і модифікувати ієрархії понять.

Для зручнішого представлення інформації користувачеві порталу в редакторі онтологій включені засоби налагодження візуалізації знань і даних, які дозволяють для кожного класу онтології задати шаблон візуалізації об'єктів цього класу і шаблон візуалізації посилань на ці об'єкти. Управління контентом порталу здійснюється за допомогою керованої онтологією редактора даних, який дозволяє створювати, редагувати і видаляти інформаційні об'єкти (екземпляри класів) і зв'язки між ними.

Для автоматизації поповнення контенту порталу знань релевантними інформаційними ресурсами, був розроблений колекціонер онтологічної інформації, який здійснює збір, аналіз, оцінку релевантності, автоматичне індексування і класифікацію інтернет-ресурсів.

Основним елементом є сховище, в якому містяться знання і дані в внутрішньому форматі. Підсистема індексування призначена для побудови індексів для прискорення роботи підсистем пошуку і виведення інформації. Блок резервування, що підтримує роботу з декількома резервними копіями інформації з сховища, підтримує можливості резервування і відновлення всього сховища або його частини, а також підтримує планувальник. Також можливий режим, коли історія зміни сторінок зберігається в резервних копіях, щоб не завантажувати старими версіями документів, основну базу. Це приводить до збільшення швидкості роботи підсистем пошуку і виведення інформації, але знижує швидкість доступу до історії змін. Засоби тестування призначені для вирішення завдань навчання молодих фахівців, співробітників, підвищення кваліфікації, перепідготовки і тестування.

Система захисту забезпечує захист від несанкціонованого доступу і небажаних дій.

**Перелік використаних джерел:** 1. *Vladimir Gorovoy, Tatiana Gavrilova. Technology for ontological engineering lifecycle support. //International Journal “Information Theories & Applications” Vol.14 / 2007 – p. 19–25.* 2. *Арлазаров В.В. Структурирование визуальных представлений информационной среды и методы определения надежности распознавания // Автореферат диссертации на соискание ученой степени к.т.н. М. 2004. С. 25.*

**Bibliography (transliterated):** 1. *Vladimir Gorovoy, Tatiana Gavrilova. Technology for ontological engineering lifecycle support. //International Journal “Information Theories & Applications” Vol.14 / 2007 – p. 19–25.* 2. *Arlazarov V.V. Strukturirovanie vizual'nyh predstavlenij informacionnoj sredy i metody opredelenija nadezhnosti raspoznavanija // Avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni k.t.n. M. 2004. S. 25.*

*Є.О. ЯКОВЕНКО*, Херсон, Україна,  
*В.М. ТОНКОНОГИЙ*, д-р техн. наук, Одеса, Україна,  
*В.Д. ЯКОВЕНКО*, канд. техн. наук, Херсон, Україна

## **МАТЕМАТИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ ОРГАНІЗАЦІЙНИХ ЗНАНЬ (СУЯОЗ)**

Розглянуто алгоритм визначення рівня організаційних знань (РОЗ) та їх оцінювання. Проведено моделювання процесу автоматизованого управління РОЗ. Проведено оцінювання множини показників РОЗ матричним методом та методом експертного оцінювання.

Рассмотрен алгоритм определения уровня организационных знаний (УОЗ) и их оценивания. Проведено моделирование процесса автоматизированного управления УОЗ. Проведено оценивание множественного числа показателей УОЗ матричным методом и методом экспертного оценивания.

*E.O. JAKOVENKO, V.M. TONKONOGIJ, V.D. JAKOVENKO*  
*SOFTWARE OF A CONTROL SYSTEM FUNCTIONING OF ORGANIZATIONAL  
KNOWLEDGE QUALITY*

The algorithm of determination of level of organizational knowledges (LOK) and their evaluation was observed. The design of process of the automated management of LOK was Conducted. The evaluation of numerous of indexes of LOK was done by a matrix method and method of expert evaluation.

*Обґрунтування кількісних і якісних критеріїв оцінки функціонування СУЯОЗ.* Визначення рівня організаційних знань (РОЗ) належить до основних завдань, що стоять перед будь-якою організацією. Дотепер відсутні серйозні дослідження в області систем якості, немає загальноприйнятих, формалізованих систем оцінювання РОЗ. Кількісне оцінювання (вимірювання) РОЗ відноситься до найбільш складних задач і є найменш дослідженим, тоді як необхідність, актуальність і практична значущість таких робіт достатньо велика.

У даний час основною тенденцією в області гарантій рівня освіти стає контроль РОЗ на базі національних систем атестації і акредитації на

основі моделі управління рівнем організаційних знань. Це забезпечує відповідальність за рівень і оцінку організаційних знань.

Трудомісткість, ефективність, проблема обґрунтування кількісних і якісних критеріїв оцінки такого комплексного завдання важко піддається прямому оцінюванню. У той же час ієрархічна структура дозволяє провести її декомпозицію до рівня досить простих завдань, і побудувати алгоритми оцінювання.

З метою рішення поставлених задач використовуються методи системного аналізу, теорії ієрархічних багаторівневих систем, теорії прийняття рішень, теорії вірогідності і статистики, матричний метод.

Проводиться моделювання процесу автоматизованого управління рівнем організаційних знань та їх оцінювання. Для цього пропонується модель організаційних знань, під якою розуміється певна сукупність показників і критеріїв, що характеризують основні компоненти організаційних знань, а також опис рівнів досконалості (кваліметричних шкал у вигляді матриць) всіх критеріїв.

Для визначення рівня організаційних знань та їх оцінювання розроблено алгоритм, який враховує такі фактори:

- еталони, стандарти діяльності кожної категорії працівників організації, де закладаються вимоги суспільства, держави до їх діяльності;
- апарат оцінювання, який включає задані параметри розвитку керованого об'єкту, показники та критерії оцінки цих параметрів та спосіб оцінювання;
- технологію контролю, яка поєднує процеси зовнішньої оцінки та самооцінки з поточним зовнішнім коригуванням (за результатом) та самокоригуванням (за процесом, спрямованим на результат).

Звичайно, рівень організаційних знань не можна оцінити на основі характеристики однієї властивості і тоді його можна оцінити деякою зведеною (узагальненою) величиною - узагальненим показником рівня організаційних знань (УПРОЗ).

Порядок формування УПРОЗ включає:

- вибір і представлення загальної схеми системи;
- формування групи експертів;
- опис характеристик системи і її складових;
- визначення векторів пріоритетів показників та критеріїв;
- визначення узгодженості локальних пріоритетів;
- формування шкали бальних оцінок;

– вибір і формування узагальненого показника рівня знань.

Доцільно дати аналіз одержаного УПРОЗ.

Формування групи експертів здійснюється із числа фахівців, які володіють професійними знаннями у вищій професійній освіті. Група експертів повинна включати не менше 5 і не більше 10 осіб, автор пропонує 6 експертів для проведення моделювання, причому автор одночасно виступає у ролі кожного експерта. Шкала оцінювання від 1 до 5 балів.

Опис характеристик системи включає такі показники, які експерти вважають найважливішими при визначенні якості рівня організаційних знань. Для цього задачу представляють у вигляді ієрархії або мережі. Ієрархія будується з цілі, яка розташовується у вершині ієрархії. Через проміжні рівні, на яких розташовані критерії і від яких залежать наступні рівні, до найнижчого рівня, який складається із набору варіантів. При проведенні експертами оцінки множини показників використані матричний метод та метод експертного оцінювання. Обробка результатів оцінювання рівня організаційних знань суязоз за допомогою цих математичних методів визначає залежності між вимірюваннями різних експертів і тим самим встановлює єдність і відмінність у думках експертів.

*Оцінка кількісних і якісних показників РОЗ суязоз матричним методом.* Матричний метод потребує структурування задачі учасниками розв'язання задач прийняття рішень, тобто необхідно скласти ієрархію у відповідності з ціллю задачі, розумінням критеріїв (або факторів) і існуючими варіантами вибору.

Визначення векторів пріоритетів показників та критеріїв дає змогу виявити важливіші з них, на основі їх попарного порівняння.

Парні порівняння приводять до запису характеристик порівнянь у вигляді квадратної таблиці чисел, яка називається матрицею.

Порівнюючи набір критеріїв один з одним, отримуємо наступну матрицю:

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2n} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & \dots & a_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix}$$

Ця матриця обернено симетрична, тобто має властивість

$$a_{ij}=1/a_{ji} \quad (2.1)$$

де індекси  $i$  та  $j$  – номер рядка  $i$  – номер стовпчика .

При порівнянні елемента із самим собою маємо рівну значимість. Це значить, що на перетині рядка  $i$  стовпчика з однаковими номерами заносимо одиницю, тому головна діагональ повинна складатися із одиниць.

Таким чином, матриця парних суджень має вигляд:

$$\begin{pmatrix} 1 & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & a_{23} & \dots & a_{2n} \\ 1/a_{13} & 1/a_{23} & 1 & \dots & a_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & 1/a_{3n} & \dots & 1 \end{pmatrix}$$

Коли задача представлена у вигляді ієрархічної структури, матриця формується для попарного порівняння критеріїв на другому рівні по відношенню до загальної цілі, розташованої на першому рівні. Такі ж матриці будуються для парних порівнянь кожного варіанту на третьому рівні по відношенню до критеріїв другого рівня.

Матриця формується наступним чином:

Ціль	К1	К2	К3
К1			
К2			
К3			

При проведенні попарних порівнянь ставляться такі питання:

- Який з елементів важливіший або має більшу дію на ціль?
- Який з елементів більш вірогідний?
- Який з елементів переважає?

Клітинки матриці заповнюються згідно із суб'єктивними судженнями групи експертів.

Коли в розв'язанні задачі прийняття рішень приймають участь декілька чоловік, по багатьох судженнях можуть виникати суперечки. В таких випадках обговорення базується на припущеннях, із яких слідують судження, а не на кількісних величинах самих суджень. Іноді група приймає геометричне середнє різних оцінок в якості загальної оцінки суджень.

$$\tilde{x}_{геом} = \sqrt[n]{x_1 \cdot x_2 \cdot \dots \cdot x_n} \quad (2.2)$$

Геометрична середня величина дає найбільш правильний за змістом результат, якщо задача полягає у знаходженні ознаки, яка якісно була б рівно віддалена як від максимального, так і від мінімального значення ознаки.

Із груп парних порівнянь формується набір критеріїв, які виражають відносний вплив елементів на елемент, розташований на рівні вище.

Для визначення відносної цінності кожного елемента необхідно знайти геометричне середнє і для цього перемножити  $n$  елементів кожного рядка і із отриманого результату знайти корінь  $n$ -го степеня.

$$\omega_i = \sqrt[n]{a_{i1} \cdot a_{i2} \cdot \dots \cdot a_{in}} \text{ ,} \quad (2.3)$$

де  $\omega_i$  – геометрична середня величина;  $a_{in}$  – елемент відповідного рядка.

Отримані числа необхідно нормалізувати.

Проводимо нормалізацію отриманих чисел. Визначаємо нормуючий множник за формулою

$$r = \omega_1 + \omega_2 + \omega_3 + \dots + \omega_n \quad (2.4)$$

де  $r$  – нормуючий множник;  $\omega_n$  – геометрична середня величина  $n$ -го рядка.

Кожне із чисел  $\omega_i$  ділимо на  $r$

$$q_{2i} = \omega_i / r, \quad (2.5)$$

де  $i=1,2,3, \dots, n$  - номер рядка матриці суджень;  $q_{2i}$  – вектор пріоритетів критеріїв другого рівня.

В результаті отримуємо вектор пріоритетів

$$q_2 = (q_{21}, q_{22}, q_{23}, \dots, q_{2n}), \quad (2.6)$$

де індекс 2 означає, що вектор відноситься до другого рівня ієрархії.

Подібну процедуру застосовують для всіх матриць парних суджень.

Визначення узгодженості локальних пріоритетів застосовують для матриці суджень, бо вона, не узгоджена, так як судження відображають суб'єктивні думки експертів, а порівняння елементів, які мають кількісні еквіваленти, може бути неузгодженим із-за похибки проведення вимірювань. За допомогою матричного методу можливо провести таку оцінку степеня узгодженості при вирішенні конкретної задачі. Разом з матрицею парних суджень маємо міру оцінки степеня відхилення від узгодженості. Коли такі відхилення перевищують встановлені норми – необхідно їх переглянути.

Для цього необхідно визначити індекс узгодженості і відношення узгодженості ( $IU, VU$ ). Індекс узгодженості в кожній матриці може бути виражений наступним способом:

1) визначається сума кожного  $j$ -го стовпчика матриці суджень

$$s_j = a_{1j} + a_{2j} + a_{3j} + \dots + a_{nj} \quad (2.7)$$

де  $s_j$  – сума кожного  $j$ -го стовпчика матриці суджень;  $a_{nj}$  – елементи  $j$ -го стовпчика матриці суджень;  $j=1,2,3, \dots, n$  – номер стовпчика матриці суджень.

2) потім отриманий результат множиться на  $j$ -ту компоненту нормалізованого вектора пріоритетів  $q_2$ , тобто суму суджень першого стовпчика на першу компоненту, суму суджень другого стовпчика – на другу і т.д.

$$p_j = s_j \cdot q_{2j} \quad (2.8)$$

де  $j=1,2,3, \dots, n$  – номер стовпчика матриці суджень;

$s_j$  – сума кожного  $j$ -го стовпчика матриці суджень;

$q_{2i}$  – вектор пріоритетів критеріїв другого рівня.

3) сума чисел  $p_j$  відображає пропорційність переваг, чим ближча ця величина до  $n$ , тим більш узгоджені судження

$$\lambda_{max} = p_1 + p_2 + p_3 + \dots + p_n \quad (2.9)$$

де  $\lambda_{max}$  – пропорційність переваг.

Відхилення від узгодженості виражається індексом узгодженості за формулою  $IU = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$ , (2.10)

де  $n$  – розмір матриці суджень;  $\lambda_{max}$  – пропорційність переваг.

Таблиця 2.1 – Середні значення індексу випадкової узгодженості ( $BI$ ) для випадкових матриць суджень різного порядку

Розмір матриці	(BI)	Розмір матриці	(BI)
1	0.00	9	1.45
2	0.00	10	1.49
3	0.58	11	1.51
4	0.90	12	1.48
5	1.12	13	1.56
6	1.24	14	1.57
7	1.32	15	1.59
8	1.41		

*Відношення узгодженості.* Для визначення того, на скільки точно  $IU$  відображає узгодженість суджень його необхідно порівняти із випадковим індексом ( $BI$ ) узгодженості, який відповідає матриці із випадковими судженнями.

В таблиці 2.1 наведені середні значення індексу  $BI$  для випадкових матриць суджень різного порядку.

Відношення  $IU$  до середнього значення випадкового індексу узгодженості  $BI$  називається відношенням узгодженості ( $BU$ ) і визначається за формулою

$$BU = \frac{IU}{BI}, \quad (2.11)$$

де,  $BU$  – відношення узгодженості;  $IU$  – індекс узгодженості;  $BI$  - випадковий індекс узгодженості.

Для визначення пріоритетів оцінок необхідно локальні пріоритети помножити на пріоритет відповідного показника першого рівня і знайти суму по кожному елементу у відповідності з критерієм, на який впливає цей елемент. Тоді пріоритет оцінок визначається за формулою

$$q_n = q_{31n} \cdot q_{21} + q_{32n} \cdot q_{22} + q_{33n} \cdot q_{23} + \dots + q_{3nn} \cdot q_{2n} \quad (2.12)$$

де,  $q_n$  – пріоритет оцінки;  $q_{2n}$  – вектори пріоритетів критеріїв другого рівня.

*Оцінка РОЗ методом експертних оцінок.* Обробкою результатів експертного оцінювання можна визначати залежності між ранжуванням різних експертів і тим самим встановлювати єдність і відмінність у думках експертів. Важливу роль грає також встановлення залежності між ранжуваннями, які побудовані за різними критеріями порівняння показників. Виявлення таких залежностей дозволяє розкрити зв'язані показники порівняння і здійснити їх угруповання за ступенем зв'язку.

Вибираємо алгоритм обробки результатів експертного оцінювання множини показників. Хай  $m$  експертів провели оцінку  $n$  показників за  $h$  ознаками. Результати оцінки представлені у вигляді величин, де  $j$  – номер експерта,  $i$  - номер показника,  $h$  – номер ознаки порівняння.

Величини  $x_{ij}^h (i = 1, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m; h = 1, 2, \dots, l)$  отримані методами безпосередньої оцінки або послідовного порівняння, тобто  $x_{ij}^h$  є числами, або балами. Для отримання групової оцінки показників скористаємося середнім значенням оцінки для кожного показника:

$$x_i = n \sum_{j=1}^m \sum_{h=1}^l q_n x_{ij}^h k_j (i = 1, 2, \dots, n), \quad (2.13)$$

де  $q_n$  - коефіцієнти вагомості показників,  $k_j$  - коефіцієнти компетентності експертів. Коефіцієнти вагомості показників і компетентності експертів є нормованими величинами:

$$\sum_{i=1}^n q_n = 1; \sum_{j=1}^m k_j = 1. \quad (2.14)$$

Коефіцієнти вагомості показників можуть бути визначені експертним шляхом. Якщо  $q_{nj}$  - коефіцієнт ваги  $n$ -го показника, який присвоюється  $j$ -м експертом, то коефіцієнт ваги  $n$ -го показника за всіма експертами рівний:

$$q_n = \sum_{j=1}^m q_{nj} k_j (n = 1, 2, \dots). \quad (2.15)$$

Отримання групової експертної оцінки шляхом підсумовування індивідуальних оцінок з вагами компетентності і важливості показників при вимірюванні властивостей показників в кардинальних шкалах ґрунтується на припущенні про виконання аксіом теорії корисності фон Неймана-Моргенштерна як для індивідуальних, так і для групової оцінки і умов не-виразності показників у груповому відношенні, якщо вони невиразні у всіх індивідуальних оцінках (частковий принцип Парето).

Алгоритм обчислення коефіцієнтів компетентності експертів має вид рекурентної процедури:

$$x_i^t = \sum_{j=1}^m x_{ij} k_j^{t-1} (i = 1, 2, \dots, n); \quad (2.16)$$

$$k_j^t = \frac{1}{\lambda^t} \sum_{i=1}^n x_{ij} x_i^t; \sum_{j=1}^m k_j^t = 1 (j = 1, 2, \dots, m); \quad (2.17)$$

$$\lambda^t = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m x_{ij} x_i^t (t = 1, 2, \dots). \quad (2.18)$$

Обчислення починаються з  $t=1$ . Початкові значення коефіцієнтів компетентності приймаються однаковими і рівними  $k_j^0 = 1/m$ . Тоді групові оцінки показників першого наближення дорівнюють середнім арифметичним значенням оцінок експертів:

$$x_i^1 = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m x_{ij} \quad (i=1,2,\dots,n). \quad (2.19)$$

Далі обчислюється величина  $\lambda^1$ :

$$\lambda^1 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m x_{ij} x_i^1 \quad (2.20)$$

і значення коефіцієнтів компетентності першого наближення за формулою:

$$k_j^1 = \frac{1}{\lambda^1} \sum_{i=1}^n x_{ij} x_i^1. \quad (2.21)$$

Використовуючи коефіцієнти компетентності першого наближення, можна повторити весь процес обчислення за формулами (2.16), (2.17), (2.18) і отримати другі наближення величин  $x_i^2, \lambda^2, k_j^2$ .

Повторення рекурентної процедури обчислень оцінок показників і коефіцієнтів компетентності природно ставить питання про її збіжність. Для розгляду цього питання виключимо з рівнянь (2.16), (2.17) змінні  $k_j^{t-1}, x_i^t, k_j^{t-1}$  і  $x_i^t$  і представимо ці рівняння у матричній формі:

$$x^t = \frac{1}{\lambda^{t-1}} B x^{t-1}; k^t = \frac{1}{\lambda^t} C k^{t-1} \quad (t=1,2,\dots), \quad (2.22)$$

де матриці  $B$  розмірності  $n \times n$  і  $C$  розмірності  $m \times m$  рівні:

$$B = X X', C = X' X, X = \|x_{ij}\|. \quad (2.23)$$

Якщо матриці  $B$  і  $C$  позитивні і нерозкладні, то, як це витікає з теореми Перона – Фробеніуса, при  $t \rightarrow \infty$  вектори  $x^t$  і  $k^t$  - сходяться до власних векторів матриць  $B$  і  $C$ , відповідним максимальним власним числам цих матриць:

$$x = \lim_{t \rightarrow \infty} x^t, k = \lim_{t \rightarrow \infty} k^t. \quad (2.24)$$

Граничні значення векторів  $x$  і  $k$  можна обчислити з рівнянь:

$$\begin{aligned} Bx &= \lambda_B x, \sum_{i=1}^n x_i = 1, |B - \lambda_B E| = 0, \\ Ck &= \lambda_C k, \sum_{j=1}^m k_j = 1, |C - \lambda_C E| = 0, \end{aligned} \quad (2.25)$$

де  $\lambda_B, \lambda_C$  максимальні власні числа матриць  $B$  і  $C$ .

Умова позитивності матриць  $B$  і  $C$  легко виконується вибором ненегативних елементів  $x_{ij}$  матриці  $X$  оцінок показників експертами.

Умова нерозкладності матриць  $B$  і  $C$  практично виконується, оскільки, якщо ці матриці розкладні, то це означає, що експерти і показники розпадаються на незалежні групи. При цьому кожна група експертів оцінює тільки показники своєї групи.

Практичне обчислення векторів групової оцінки показників і коефіцієнтів компетентності простіше виконувати за рекурентними формулами (2.16), (2.17), (2.18). Визначення граничних значень цих векторів по рівнянню (2.25) вимагає застосування комп'ютерної техніки.

**Перелік використаних джерел:** 1. Демиденко А.А. Оценка качества функционирования системы управления качеством продукции [Текст] / А.А.Демиденко, И.А. Демиденко, А.И. Демиденко // Сб. тр. III МНТК «Проблемы повышения качества промышленной продукции», г. Брянск. –2003. – 186 с. 2. Дмитренко, Г.А. Стратегічний менеджмент: цільове управління освітою на основі кваліметричного підходу [Текст] / Г.А. Дмитренко, В.В. Олійник // – К.: ІЗМН, 1996.– 140 с. 3. Циба, В.Т.Основи теорії кваліметрії: Навч. пос. [Текст] / В.Т. Циба // – К.: ІЗМН, 1997. – 160 с. 4. Штефан, И.А. Математические методы обработки экспериментальных данных: Учебное пособие [Текст] / И.А. Штефан, В.В. Штефан // ГУ Кузбасский государственный технический университет. – Кемерово, 2003. – 123 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Demidenko A.A. Ocenka kachestva funkcionirovaniya sistemy upravleniya kachestvom produkcii [Tekst] / A.A.Demidenko, I.A. Demidenko, A.I. Demidenko // Sb. tr. III MNTK «Problemy povysheniya kachestva promyshlennoj produkcii», g. Brjansk. –2003. – 186 s. 2. Dmitrenko, G.A. Strategichnij menedzhment: cil'ove upravlinnja osvituju na osnovi kvalimetrichnogo pidhodu [Tekst] / G.A. Dmitrenko, V.V. Olijnik // – K.: IZMN, 1996.– 140 s. 3. Ciba, V.T.Osnovi teorії kvalimetrii: Navch. pos. [Tekst] / V.T. Ciba // – K.: IZMN, 1997. – 160 s. 4. Shtefan, I.A. Matematicheskie metody obrabotki jeksperimental'nyh dannyh: Uchebnoe posobie [Tekst] / I.A. Shtefan, V.V. Shtefan // GU Kuzbasskij gosudarstvennyj tehničeskij universitet. – Kemerovo, 2003. – 123 s.

**К 50-ЛЕТИЮ СО ДНЯ ОСНОВАНИЯ  
ИНСТИТУТА СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ  
ИМ. В.Н. БАКУЛЯ НАН УКРАИНЫ**

Сегодня невозможно представить себе Украину, ее экономику, науку и образование без Института сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины. Полувековой исторический отрезок времени для этого уникального научного института, его коллектива был сложным, напряженным и в не меньшей степени продуктивным.

Рожденный вслед за первыми сенсационными сообщениями о получении рукотворного алмаза, институт, изначально довольствовавшийся ограниченным пространством, прилегающим к курневской улице Вербовой, очень быстро превратился в мощный мировой центр создания и производства синтетических алмазов, алмазного инструмента, прецизионных технологий обработки материалов. Это был чрезвычайно важный значительный скачок в неизведанную область науки и технологии, создавший все предпосылки для совершенствования существующих и вновь открываемых производств, охватывающих широчайший круг отраслей народного хозяйства.

...Держу в руках черно-белый фотоснимок. Сентябрь 1971 года, 10-летний юбилей ИСМ НАН Украины, первая в СССР международная конференция по применению синтетических алмазов в промышленности. После блестящих заседаний, замечательного концерта и приема во дворце «Украина» (масштабы поражают воображение!) – прогулка по Днепру, зеленая остановка на берегу. Столько знакомых, преисполненных энтузиазмом лиц из Москвы, Тбилиси, Харькова, Челябинска, Еревана, Куйбышева, Ташкента, Воронежа, Перми, Ленинграда, Львова... У каждого из них своя «алмазная» биография. Многих, увы, уже нет в живых.

У харьковчан тоже свой отсчет «алмазного» времени, которым мы гордимся. Начало ему положил основатель Харьковского (теперь Национального) университета Василий Назарович Каразин. Он в далеком 1823 г. проводил в сельских условиях эксперименты с веществами, содержащими углерод, и получил чрезвычайно твердые кристаллы, хотя идентификации с алмазами не проводилось. Подобные попытки продолжил еще один харьковчанин – Константин Дмитриевич Хрущов, получивший степень доктора Honoris Causa (как и Валентин Николаевич Бакуль) в этом же университете. Харьковские корни просматриваются и у академика Леонида Федоровича Верещагина, который был аспирантом в украинском физико-техническом институте в Харькове. О «харьковском периоде жизни» Валентина Николаевича Бакуля сказано и написано много.

В этот ряд «алмазников», на мой взгляд, органично вписывается и Михаил Федорович Семко, 33 года возглавлявший Харьковский политехнический институт, доктор технических наук, профессор, Герой Социалистического труда. Именно он многое сделал для того, чтобы понять физические основы процессов резания сверхтвердыми инструментами, установить механизмы физико-химического взаимодействия алмазных и нитридных инструментов с различными группами материалов, обрабатываемых точением, фрезерованием, выглаживанием, шлифованием, хонингованием, суперфинишем.

Проведение первой международной алмазной конференции в 1971 году в Киеве стало убедительным актом всеобщего признания достижений отечественной науки и производства. Ведь среди 700 ученых и специалистов из четырнадцати стран – США, Франции, ФРГ, ГДР, Великобритании, Венгрии, Швеции, Бельгии и др. – были и автор первого синтеза алмазов швед Е. Лундблат, знаменитый «кудесник» природных алмазов Ж. Бонруа из Бельгии, представители всемирно известной «Де-Бирс» (Великобрита-

ния) и «Дженерал Электрик» (США), которые к тому времени уже освоили не только промышленный синтез алмазов, но и успешно добивались реализации их потенциала. Их высокая оценка достижений СССР в алмазной отрасли многое в то время означала.

У меня как участника конференции сложилось твердое убеждение в том, что в сознании руководящих (партийных и государственных) работников, ученых, специалистов промышленности успехи алмазной отрасли прочно связывались с экономическим потенциалом страны.

Второй вывод: изучение физики алмазов позволяет создавать кристаллы с заранее заданными свойствами, а, значит, возможно производство алмазов развивать по пути специализации, создавая гаммы шлифпорошков, микропорошков, субмикропорошков с различными значениями прочности, хрупкости, удельной поверхности, формы зерен и т. д.

Третий вывод. Создание поликристаллов крупных размеров открывает принципиально новые технологические возможности лезвийной обработки инструментами из СТМ.

Четвертый вывод – личные человеческие контакты общения ученых и специалистов – бесценны.

В Харьковском политехническом без колебаний восприняли возможность активного участия в научных исследованиях и реализации разработок в алмазной отрасли. Исследования в Отраслевой лаборатории алмазных инструментов Минстанкинпрома СССР и Проблемной лаборатории кафедры «Резание материалов и режущие инструменты» широким фронтом развернулись под руководством ректора института Михаила Федоровича Семко. ВУЗ участвовал во всех координационных планах киевлян и Министерств, проводившихся научно-практических семинарах, научно-технических конференциях. На алмазную область были сориентированы тематика работы аспирантов и докторантов, а также научно-

исследовательских дипломных работ студентов. При поддержке ИСМ были организованы первые (показательные) участки алмазной заточки инструментов на заводе «Электротяжмаш», «Серп и Молот», «Инструментальный» и др. В рамках специальности «Технология машиностроения» была открыта подготовка инженеров по специализациям «Высокие технологии в машиностроении» и «Алмазные инструменты и процессы обработки». В первые годы формирования ИСМ из Харьковского политехнического в Киев прибыл многочисленный «десант» молодых инженеров различных специальностей. Среди них – А. Шепелев, Э. Гриценко, В. Коробко, Р. Маслов, В. Артюхов и др.

По результатам проведенных исследований в рамках алмазной тематики кафедры защищено 77 кандидатских и 17 докторских диссертаций, в том числе гражданами из Венгрии, Армении, Вьетнама, Индии, Колумбии, ГДР, Болгарии.

Докторскую диссертацию Михаила Федоровича Семко в Совете Киевского политехнического института оппонировали в 1968 году Валентин Николаевич Бакуль, Наум Иосифович Резников (Куйбышев), Петр Родионович Родин. В тридцатые годы Н.И. Резников руководил кафедрой и аспирантской работой М. Семко, а также тесно сотрудничал с В.Н. Бакулем по вопросам применения твердосплавных инструментов в промышленности – заводы Харькова, Краматорска, Ворошиловграда и др.

Сотрудничество ИСМ и ХПИ непрерывно развивалось на всех уровнях в самых различных областях. Решаемые проблемы были взаимно близкими.

Возникшие между В.Н. Бакулем и Л.Ф. Верещагиным расхождения быстро перестали быть тайной для многих и многих. М.Ф. Семко, глубоко уважая этих великих людей – земляков, имея с каждым из них самые добрые отношения, неоднократно предпринимал попытки к их примире-

нию. Однако лишь к 1977 году ему удалось получить согласие В.Н. Бакуля и Л.Ф. Верещагина на участие во Всесоюзной алмазной конференции, которую планировал провести Михаил Федорович в Харькове. Мы все радовались неизбежно предстоящей встрече трех Героев Социалистического труда в стенах первого инженерного вуза Украины, в городе, в котором столько времени они все трудились. Но этой встрече не суждено было состояться: преждевременно ушел из жизни Леонид Федорович (февраль 1977), почти вслед за ним ушел Валентин Николаевич (июнь 1978), а через год и Михаил Федорович (сентябрь 1979). Не стало трех выдающихся Личностей.

К этому времени новый директор ИСМ НАН Украины Николай Васильевич Новиков сделал первые, может быть самые ответственные шаги. Они оказались мудрыми.

Отдавая должное всему, что было наработано институтом «до него», проявляя внимательное бережливое отношение к «алмазным первопроходцам», тщательно оберегая сложившиеся связи, Николай Васильевич умело разворачивал огромный корабль, направляя его по несколько иному курсу, который оказался тщательно выверенным, а может быть и единственно правильным. Академическая «прописка» института обязывала, не теряя прошлого, сделать крен в сторону фундаментальных научных исследований.

Стали заметны элементы обновления – появление новых отделов и лабораторий, достойное место заняли работы в области прочности и материаловедения, появилась оборонная тематика, возмужал, обрел новое лицо и английский язык сборник «Синтетические алмазы», возросло количество докторов технических наук (А.А. Сагарда, В.Э. Рыжов, А.М. Розенберг, О.А. Розенберг, В.П. Бондаренко, Л.Н. Девин, И.Х. Чеповецкий, А.Л. Майстренко, В.З. Туркевич, С.А. Клименко, В.И. Сидорко и др.). Соз-

дается Совет по защитах докторских диссертаций. Закрепляются существовавшие и устанавливаются новые связи с зарубежными научными центрами, ведущими фирмами. География этих связей обширна – Япония, США, ЮАР, страны ЕС.

Подбор кадров начинается со студенческой скамьи: в Харькове создается учебно-научно-производственное объединение – НТУ «ХПИ», ИСМ НАНУ, машиностроительный завод «ФЭД», инструментальный завод, и др., а в НТУУ «КПИ» и НАУ создаются совместные с ИСМ учебно-исследовательские центры.

Особого признания заслуживают огромные усилия, стратегия и тактика действий директора ИСМ НАНУ им. Бакуля В. Н. академика Н. В. Новикова в условиях рыночной экономики, направленные на обеспечение жизнедеятельности института, не только его выживание, но и дальнейшее развитие.

Н.В. Новиков руководит и сам лично участвует в проведении научных исследований, в программах реализации их результатов, в международных проектах.

Судьба мудро поступила, определив Николаю Васильевичу место у руля ИСМ НАНУ им. В.Н. Бакуля. Личность незаурядная, Николай Васильевич сыграл и играет важнейшую для науки, для страны, роль человека, ученого, консолидирующего интеллект многих и многих причастных к науке, производству, высшему образованию, международному сотрудничеству.

Под его началом мне приходилось длительное время участвовать в работе Комиссии по машиностроению Комитета по Государственным премиям Украины в области науки и техники, быть его заместителем в Экспертном Совете ВАК Украины по машиностроению. Вот уже много лет подряд Николай Васильевич является сопредседателем и соорганиза-

тором международной научно-технической конференции «Интерпартнер–высокие технологии в машиностроении», получившей всеобщее признание.

И всегда я поражался удивительному сочетанию многих талантов в Николае Васильевиче и тому, как эти таланты служат людям – известным и безвестным, молодым и маститым. Ученый Совет НТУ «Харьковский политехнический институт» избрал Николая Васильевича Почетным Доктором, а наша кафедра – Почетным профессором кафедры «Интегрированные технологии машиностроения» им. М.Ф. Семко.

Полувековой юбилей Института сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины – событие чрезвычайно уникальное. Такой промежуток времени в его истории по насыщенности событий, блестящих побед и трудных неудач иному заведению хватило бы более чем на столетие. Сегодня, оглядываясь на прошедшее, можно с уверенностью говорить о том, что создание и функционирование такого мощного центра, его роль в развитии всей алмазной отрасли является не только результатом того позитивного, что несомненно было в советской системе, но и подтверждением важности создания такой философии коллектива, которая позволила и в негативных условиях перехода к рыночной экономике устоять, адаптироваться к вызовам нового времени, найти такие внутренние интеллектуальные ресурсы, которые выявились базой дальнейшего развития, не взирая на те или иные потери и издержки.

Я горжусь тем, что судьба сделала меня причастным к эпохе сверхтвердых материалов, причастным к огромному сообществу «алмазников», общепризнанным генеральным центром которого стал Институт сверхтвердых материалов имени В.Н. Бакуля НАН Украины.

Я горжусь тем, что по решению Ученого Совета этого института награжден «Почетной Бакулевской медалью» (2001 г.).

Хочется пожелать коллективу этого замечательного института, его руководителю, всем коллегам и друзьям успешного покорения новых вершин.

**Список использованных источников:** 1. Бакуль В.Н. Вибрані праці. Біографія, спогади учасників / Відп. ред. М.В. Новікова. – Київ, ІНМ НАНУ, 2006. – 668 с., іл. 2. Сверхтвердые материалы. Получение и применение. Монография в 6 томах / Под общей редакцией Н.В. Новикова. – Киев: ИСМ им. В.Н. Бакуля, ИПЦ «АЛКОН» НАНУ, 2003. 3. Моисеев В. Известен в мире алмазов / ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины. – К.: ИПЦ «АЛКОН» НАН Украины, 2007, 256 с., вкл. 24. 4. Алмаз Украины. Пятидесятилетие работы Института сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля (1961–2011 гг.) – К.: «Азимут–Украина». – 2011. – 448 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Bakul' V.N. Vibrani praci. Biografija, spogadi uchasnikiv / Vidp. red. M.V. Novikova. – Kiïv, INM NANU, 2006. – 668 s., il. 2. Sverhtverdye materialy. Poluchenie i primenenie. Monografija v 6 tomah / Pod obwey redakciej N.V. Novikova. – Kiev: ISM im. V.N. Bakulja, IPC «ALKON» NANU, 2003. 3. Moiseev V. Izvesten v mirealmazov / ISM im. V.N. Bakulja NAN Ukrainy. – K.: IPC «ALKON» NAN Ukrainy, 2007, 256 s., vkl. 24. 4. Almaz Ukrainy. Pjatidesjatiletie raboty Instituta sverhtverdyh materialov im. V.N. Bakulja (1961–2011 gg.) – K.: «Azimut–Ukraina». – 2011. – 448 s.

А.И. Грабченко

Зав. кафедрой «Интегрированные  
технологии машиностроения»

НТУ „ХПИ”, д-р техн. наук, профессор,

Заслуженный работник высшей школы Украины

Лауреат Государственной премии Украины

в области науки и техники

## ЗМІСТ

<i>К 65-летию со дня рождения профессора Энегельберта Весткемпера</i> .....	3
<b>ФІЗИКА ТА МЕХАНІКА ПРОЦЕСІВ ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ</b>	
<i>Внуков Ю. Н., Логоминов В. А., Бездольный С. А.</i> Определение динамических характеристик нежестких деталей типа заземленных пластин.....	6
<i>Гусев В. В., Калафатова Л. П., Олейник С. Ю.</i> Обоснование расчетной схемы для исследования динамического состояния технологической системы алмазно-абразивной обработки тонкостенных оболочек из ситаллов .....	14
<i>Данильченко Ю. М., Кривошея А. В., Карская А. О., Сторчак М. Г., Пастернак С. И.</i> Первичная генерация координатных кодов металлорежущих станков .....	23
<i>Джугуриян Т. Г., Попов В. С.</i> Определение предельных состояний технологической системы при совмещенном растачивании соосных отверстий .....	29
<i>Каптай Дж., Симонова А. А., Везуб Н. В.</i> Прогнозирование поведения субмикро- и нанокристаллических металлов при механической обработке .....	40
<i>Лавриненко С. Н.</i> Особенности применения алмазного лезвийного инструмента при обработке биомедицинских полимеров.....	52
<i>Лавриненко В. И., Пасичный О. О., Солод В. Ю.</i> Применение измельченных инструментальных материалов и минеральных концентратов в виде функциональных наполнителей в рабочем слое кругов из СТМ.....	59
<i>Леонов С. Л., Гончаров В. Д., Белов Е. Б., Белов А. Б.</i> Прогнозирование автоколебаний при точении .....	67
<i>Манохин А.С., Клименко С.А.</i> Механика контактного взаимодействия на передней поверхности косоугольного однокромочного поликристаллического инструмента с обрабатываемым материалом .....	72

*Пегловский В. В., Сидорко В. И., Ляхов В. Н.* Технологические параметры шлифования природного камня ..... 85

*Рубицки М., Кавалец М.* Ошибки формы и топография после фрезерования с различными параметрами механической обработки ..... 90

## **ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ МАШИНОБУДУВАННЯ**

*Доброскок В.Л., Абдурайимов Л.Н., Чернышов С.И., Буденный М.М.* Критерии качества триангуляции 3D моделей промышленных изделий ... 94

*Мамалис А.Г., Грабченко А.И., Федорович В.А., Кундрак Я., Бабенко Е.А.* 3D моделирование процесса алмазного шлифования методом конечных элементов ..... 100

*Оборский Г.А., Савельева О.С., Котенко Н.А.* Информационная поддержка автоматизированного структурного проектирования марковских процессов ..... 109

**Розенберг О.А., Возный В.В., Сохань С.В., Гавлик Й.**  
Трибологические особенности работы биосовместимых керамических и металлических материалов ..... 116

*Становский А.Л., Швец П.С., Щедров И.Н.* Оптимизация слабосвязанных систем в автоматизированном проектировании и управлении ..... 129

*Федоренко Д. О., Ромашов Д. В., Фадеев В.А., Федорович В. А.* Разработка методологии 3D моделирования процесса шлифования в режиме самозатачивания ..... 135

*Хейзель У., Пастернак С., Сторчак М.* Оптимизация структуры металлорежущих станков при помощи нейронных сетей ..... 141

## **ОРГАНІЗАЦІЯ ВИРОБНИЦТВА: ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ**

*Абдул Рахман О., Джаегер Дж., Константинеску К.* Синхронистический метод и инструментарий стратегического производственного планирования ..... 152

*Гогунский В.Д., Сафонова А.Ф., Становская И.И.* Автоматизированное проектирование расписания замкнутых систем массового обслуживания ..... 163

<i>Ковалев А.И.</i> Процессное управление единичным производством .....	168
<i>Константинеску К., Клут А.</i> Гибкая связь сфер продукции и производства: концепция, подход к изучению, реализация .....	180
<i>Ландхер М., Константинеску К.</i> Конфигурация предприятия и промышленных процессов: какую роль играет моделирование банка знаний?.....	190
<i>Лоффлер К., Весткемпер Э., Унгер К.</i> Изменение вызовов и адаптация автомобильного производства.....	199
<i>Мингез Дж., Силчер С., Митшанг Б., Весткемпер Э.</i> Навстречу интеллектуальному производству SOA-базирующееся оборудование с современными системами SLM .....	214
<i>Франкаланза Э., Борг Дж.К., Константинеску К.К.</i> Принятие опирающегося на инфраструктуру решения о согласованном синтезе «линейка товаров и производственная система» .....	228
<b>ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ</b>	
<i>Внуков Ю.Н., Сальников А.С., Саржинская А.Г.</i> Исследование адгезионной активности карбидных и нитридных пленок к различным металлам и сплавам.....	241
<i>Доброскок В.Л., Абдурайимов Л.Н., Чернышов С.И.</i> Критерии качества триангуляции 3D моделей промышленных изделий .....	245
<i>Крыжний Г.К.</i> Обеспечение качества продукции в двух циклах ее жизни.....	255
<i>Лебедев В.Я.</i> Обеспечение качества и безопасности инструмента для механической обработки резанием.....	263
<i>Посвятенко Э.К., Посвятенко Н.И.</i> К становлению инженерии поверхности деталей машин как приоритетного направления машиностроения.....	270
<i>Тонконогий В.М., Перпери А.А., Монова Д.А.</i> Многоцелевая оптимизация методом комплексного генетического алгоритма .....	276

## **ЕКОНОМІКА ТА ОСВІТА**

<i>Залоза В.А., Нагорный В.М., Дядюра К.А.</i> Моделирование системы поддержки принятия решений при обеспечении конкурентоспособности машиностроительной продукции на этапах ее жизненного цикла.....	272
<i>Мазур Н.П., Яновський М.Л.</i> Цифровая дистрибуция сертифицированного учебного материала и сопутствующих информационных ресурсов .....	297
<i>Ролдугин В.И.</i> Проблемы дистанционного обучения кредитных менеджеров .....	308
<i>Становский А.Л., Барчанова Ю.С., Шихирева Ю.В.</i> Формализация нечетких понятий для систем обработки стихотворного текста.....	315
<i>Яковенко Е.О., Гогунский В.М., Яковенко О.Е.</i> Стандартизация хранилищ знаний в системах управления качеством организационных знаний (СЗ СУЯОЗ) .....	321
<i>Яковенко Е.О., Тонконогий В.М., Яковенко В.Д.</i> Математическое обеспечение функционирования системы управления качеством организационных знаний (СУЯОЗ).....	325
<i>К 50-летию со дня основания института сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины .....</i>	335



**Мир  
Техники  
и Технологий**

*The World of Technics and Technologies*

"МТТ"- настольная книга для каждого руководителя,  
источник идей- для каждого "технаря",  
путеводитель по рынку- для каждого снабженца.

### **Рубрики:**

**Оборудование**

**Инструмент**

**Автоматизация**

**Технологии**

**Специнформ**

**Энергосбережение**

**Экология**

**Торговый зал**

**Наши контакты:**

+38 (057)761-20-74,761-10-66  
+38 (05746) 2-22-06 (факс)

**E-mail:**

rochta@mtt.com.ua  
mtt@mtt.com.ua

**Наш адрес:**

63503 Украина,  
Харьковская обл.,  
г. Чугуев,  
ул. Харьковская, 249

[www.mtt.com.ua](http://www.mtt.com.ua)

Науково-виробниче видання

# **СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ В МАШИНОБУДУВАННІ**

Збірник наукових праць  
Українською, російською та англійською мовами

**Випуск 6**

Відповідальний за випуск: проф. *В. О. Федорович*

Матеріали відтворено з авторських оригіналів

Підп. до друку 17.07.2011 р. Формат 70×100 1/16. Папір офісний.  
RISO-друк. Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 20,0.  
Наклад 300 прим. Зам. №

---

Видавничий центр НТУ «ХПІ».  
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 116 від 10.07.2000 р.  
61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

---