

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«Харківський політехнічний інститут»

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

1'2017

**ВИСОКІ ТЕХНОЛОГІЇ  
В МАШИНОБУДУВАННІ**

**HIGH TECHNOLOGIES  
IN MACHINE ENGINEERING**

Збірник наукових праць

Printed scientific works

УДК 621.91

ББК 34.63

В53

Державне видання

Свідоцтво Державного комітету телебачення і радіомовлення України  
КВ № 7839 від 8 вересня 2003 року

Друкується за рішенням Вченої Ради НТУ «ХПІ»,  
(протокол № 6 від 07.07.2017 р.)

Редакційна колегія:

*I. M. Пижов, д.т.н. (відповідальний редактор),  
Пупань Л. І. (зам. відповідального редактора),  
Верезуб М. В., д.т.н., Весткемпер Э., д.т.н.,  
Добросок В. Л., д.т.н., Залога В. О., д.т.н.,  
Зубар В. П., проф., Пермяков О. А., д.т.н., Ролдугін В. І., д.е.н.,  
Турманідзе Р. С., д.т.н., Узунян М. Д., д.т.н., Фадеев В. А., д.т.н.,  
Федорович В. О., д.т.н., Шнайдер Д., д.т.н.,  
Крюкова Н.В. (відповідальний секретар)*

В сборнике представлены научные труды, которые посвящены решению проблем в области высоких технологий машиностроения. Рассматриваются вопросы экологически безопасного производства, современного инструментального оснащения, применения 3D моделирования для конструирования инструментальных и рабочих поверхностей, контроля поверхностей, полученных с помощью нанотехнологий, и др.

Для специалистов в области машиностроения, научно-технических работников и студентов.

В53      **Високі технології в машинобудуванні** : зб. наук. праць. /  
редкол.: І. М. Пижов (голова) та ін. – Харків : НТУ «ХПІ»,  
2017. – Вип. 1 (27). – 186 с.

В збірнику представлені наукові праці, які присвячені вирішенню проблем в області високих технологій машинобудування. Розглянуті питання екологічно безпечноого виробництва, сучасного інструментального забезпечення, використання 3D моделювання для конструювання інструментальних та робочих поверхонь, контролю поверхонь, які отримані за допомогою нанотехнологій, технологій та ін.

Для фахівців в області машинобудування, науково-технічних працівників і студентів.

УДК 621.91

ББК 34.63

© НТУ «ХПІ», 2017

Г.И. Ищенко, Харьков, Украина

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ И РАЦИОНАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ШЛИФОВАНИЯ ЛОПАТОК ТУРБИН ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА

Досліджено вплив режимів шліфування та правки, характеристики абразивного інструменту на вихідні параметри плоского шліфування лопаток турбін в заготовках з титанового сплаву ВТ9. В результаті проведеного дослідження зроблені висновки про те, що на загальному фоні збільшення складових сил різання відношення  $Pz/Py$  знижується.

**Ключові слова:** лопатки турбін з титанового сплаву, сили різання, режими обробки, алмазна правка шліфувального круга

Исследовано влияние режимов шлифования и правки, характеристики абразивного инструмента на выходные параметры плоского шлифования лопаток турбин в заготовках из титанового сплава ВТ9. В результате проведенного исследования сделаны выводы о том, что на общем фоне увеличения составляющих силы резания отношения  $Pz/Py$  снижается.

**Ключевые слова:** лопатки турбин из титанового сплава, силы резания, режимы обработки, алмазная правка шлифовального круга

*The effect of grinding and straightening modes, characteristics of the abrasive tool on the output parameters of flat grinding of turbine blades in blanks from titanium alloy VT9 was investigated. As a result of the study, it was concluded that, against the general background of the increase in the cutting force components, the ratio  $Pz/Py$  decreases.*

**Keywords:** turbine blades made of titanium alloy, cutting forces, processing modes, diamond dressing of the grinding wheel

### Введение

Одной из наиболее важных проблем энергетического машиностроения является совершенствование конструкции паровых и гидравлических турбин.

Лопаточный аппарат является самой ответственной и наиболее дорогой частью турбины и составляет 25-30% общей трудоемкости производства турбин. К проектированию пера лопатки предъявляются повышенные требования по точности и качеству. Точность изготовления рабочей части составляет 0,01 мм. При проектировании закладывается точность расчета 0,001 мм. Вторым важным требованием является качество поверхности (шероховатость поверхности  $Ra$  0,32-0,16 мкм – близка к зеркальной поверхности). Малейшая неровность, получившаяся при проектировании геометрии пера, будет многократно усиlena при изготовлении лопатки.

Совершенствование технологии изготовления лопаток, изыскание новых более совершенных методов финишной обработки, обеспечение норм точности изготовления частей лопаток, а также снижение шероховатости поверхностей являются весьма актуальными задачами как с точки зрения повышения надежности и экономичности турбин, так и с точки зрения снижения их себестоимости. Для увеличения срока службы лопаток турбин предложен вариант их изготовления из сплава на основе титана.

## Состояние вопроса и постановка задачи

Основная причина плохой обрабатываемости сплавов на основе титана объясняется высокой адгезионной активностью металла к абразивному материалу [1]. Если в качестве критерия интенсивности адгезионного взаимодействия пары абразивный материал - металл рассматривать количество абразивного материала, перенесенного при шлифовании на поверхность металла [2], то среди d-переходных элементов по данному критерию титановый сплав относится к группе наиболее активных металлов [3]. Именно адгезионная активность титана и сплавов на его основе является причиной интенсивного износа абразивного инструмента, большой силы резания и шероховатости обработанной поверхности [4]. При шлифовании время взаимодействия пары абразив - металл существенно выше, что увеличивает негативное влияние адгезионного взаимодействия на показатели процесса. Использование специального абразивного инструмента, оптимизация режимов обработки и постоянная правка круга позволяют снизить интенсивность контактных процессов при шлифовании [5].

В данной работе рассмотрено влияние режимов шлифования и правки, характеристики абразивного инструмента на выходные параметры плоского шлифования заготовок лопаток турбин из титанового сплава.

## Методика исследований

Исследования проведены на станке для плоского шлифования модели ЛШ-232, который оснащен устройством для непрерывной правки и компенсации износа абразивного инструмента. В качестве абразивного инструмента использовали специальные шлифовальные круги типоразмера ПП-200×40×32 из электрокорунда нормального марки 15А зернистости 32 мкм и 16 мкм. Шлифовали образцы из сплава ВТ9. Размеры образцов 100×80×15 мм. Контролируемые параметры процесса плоского шлифования: составляющие силы резания  $P_x$  и  $P_z$ , режущая способность  $Q$ , наличие шлифовочных прижогов, химический состав и состояние рельефа обработанной поверхности.

Силы резания измеряли динамометром УДМ-600 и измерительным комплексом Amti MC36-1000UP с регистрацией данных на ПК с использованием специальной программы.

Состояние рельефа обработанной поверхности исследовали на растровом двухлучевом электронном микроскопе Versa 3D LoVac, соединившем в себе последние мировые достижения в области физических методов контроля качества поверхности. Микроскоп позволяет проводить электронномикроскопические исследования состояния рельефа в широком диапазоне увеличений с высокой разрешающей способностью и контрастностью изображения. Поворотный предметный столик позволяет вращать объект в горизонтальной плоскости на 360° и наклонять в вертикальной на угол от -15° до +90° с автоматическим позиционированием анализируемого участка поверхности. Исследование химического состава выполнено на этом же приборе методом локального микрорентгеноспектрального анализа.

## Результаты исследований и их обсуждение

Влияние скорости подачи стола  $V_s$  и подачи правящего ролика  $Sp$  на радиальную  $P_y$  и тангенциальную  $P_z$  составляющие силы резания показано на рис. 1.

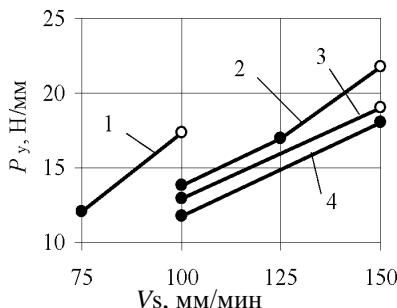


Рисунок 1 – Влияние скорости подачи стола  $v_s$  и правящего ролика  $Sp$  (указана на графике в мкм/имп) на силу  $P_y$  : ● - нет прижога; ○ - прижог

При шлифовании с  $V_s=75$  мм/мин, глубиной  $t=0,3$  мм и  $Sp=1$  мкм/имп шлифовочные прижоги на обработанной поверхности не образуются. С увеличением  $V_s$  на 25 мм/мин до 100 мм/мин составляющие силы резания возрастают в среднем в 1,3 - 1,4 раза и на обработанной поверхности после травления обнаружены белые пятна, свидетельствующие о наличии прижогов. С увеличением подачи до 2 мкм/имп на той же  $V_s$  силы снижаются более чем на 20 %. После травления обработанной поверхности изменений в структуре не обнаружено.

В связи с тем, что  $Sp$  увеличена в два раза, скорость износа круга возросла в такой же пропорции. Режущая способность  $Q$  на  $V_s = 75$  мм/мин составляет 130  $\text{мм}^3/\text{мин}\cdot\text{мм}$ , на  $V_s=100$  мм/мин,  $Q = 175 \text{ } \text{мм}^3/\text{мин}\cdot\text{мм}$ . Коэффициент шлифования  $K_{ш}$  на бездефектных режимах снизился на 10 % с 0,29 до 0,26. С целью повышения эксплуатационных показателей скорость стола увеличена до 125 мм/мин. Шлифовочные прижоги на обработанных поверхностях не обнаружены,  $Q = 216 \text{ } \text{мм}^3/\text{мин}\cdot\text{мм}$ ,  $K_{ш} = 0,41$ .

При увеличении  $V_s$  до 150 мм/мин силы  $P_z$  и  $P_y$  возросли и на обработанной поверхности появились прижоги. Для устранения прижогов увеличили подачу правящего ролика. На  $Sp = 3$  мкм/имп интенсивность прижогов снизилась, на  $Sp = 4$  мкм/имп прижоги были устраниены.  $K_{ш}$  на данном режиме в 1,4 раза ниже, чем при  $V_s = 125$  мм/мин, а режущая способность возросла всего на 20 %. При шлифовании со скоростью стола 175 мм/мин  $Sp$  увеличили до 7 мкм/имп. Но и в этом случае на некоторых образцах обнаружены штриховые прижоги. Прижоги были устраниены на  $Sp = 8$  мкм/имп.

Оптимальное сочетание производительности и расхода инструмента обеспечивается на режимах  $V_s = 125$  мм/мин и  $Sp = 2$  мкм/имп, когда  $Q = 216$   $\text{мм}^3/\text{мин}\cdot\text{мм}$  и  $K_{sh} = 0,41$ . Снижение на 40 %  $Q$  по сравнению с  $V_s = 175$  мм/мин компенсируется двоекратным сокращением расхода инструмента.

Прижог на обработанной поверхности образуется при достижении некоторого значения силы резания, зависящей от режимов шлифования [5]. Результаты данных исследований так же свидетельствуют о наличии предельного значения силы резания. При этом наблюдается тенденция роста предельного значения силы резания с увеличением скорости подачи стола.

Анализ процесса плоского шлифования необходимо делать с учетом особенностей работы круга на различных этапах, таких как врезание, добор глубины, постоянная длина дуги контакта и выход.

На этапе врезания сила резания изменяется в диапазоне от нуля до своего максимального значения в момент перехода к этапу постоянной длины дуги контакта. По такой же закономерности будет изменяться и нагрузка на кромку круга, то есть радиус кромки будет стремиться к своему минимальному значению в момент, когда подача на правку полностью компенсирует износ круга.

Наиболее нагруженным участком при врезном шлифовании является кромка круга, и износ, который определяли по радиусу образовавшегося закругления кромки, превосходит радиальный износ круга. Поэтому даже при условии обеспечения стабильного рельефа круга, обеспечиваемого непрерывной правкой, износ кромки круга может не компенсироваться правкой, что и происходит на этапе врезания. Рост нагрузки на зерна, и, соответственно, повышенный износ кромки круга являются следствием постоянно увеличивающейся длины дуги контакта и возрастающей силы резания. Скорости правки при подаче 0,3 мкм/об недостаточно для компенсации износа кромки, вследствие чего на этапе врезания радиус закругления кромки возрастает, о чем свидетельствует радиус паза со стороны входа круга.

На этапе выхода с резким падением силы резания снижается нагрузка на инструмент, что приводит к уменьшению износа кромки круга. Скорость износа инструмента в результате постоянной правки начинает превышать скорость износа кромки круга в результате взаимодействия с обрабатываемым материалом, и радиус закругления кромки уменьшается.

С уменьшением зернистости до 16 мкм составляющие силы резания в общем случае возрастают. Например, при шлифовании на  $V_s = 125$  мм/мин  $P_y$  выше почти в 1,2, а  $P_z$  – более чем в 1,3 раза. Различное влияние зернистости на составляющие силы резания приводит к тому, что с уменьшением зернистости изменяется соотношение  $P_z/P_y$ . При обработке кругом зернистости Z32 мкм  $P_z/P_y = 0,65$ , а при зернистости Z16 мкм  $P_z/P_y = 0,85$ .

Представленные данные позволяют говорить о том, что непрерывная правка оказывает существенное влияние на показатели процесса.

При шлифовании без правки  $P_z$  больше  $P_y$ , при этом составляющие силы имеют максимальное значение (рис. 2). Постоянная правка, даже при минимальной подаче  $Sp=1$  мкм/имп, снижает составляющие силы шлифования в 1,3 - 1,5 раза, в большей степени снижается  $P_z$ . С дальнейшим увеличением  $Sp$  падение сил замедляется. В диапазоне подач ролика от 1 до 2 мкм/имп силы снижаются на треть, а в интервале от 4 до 6 мкм/имп всего на 5 - 10 %. Так как с увеличением  $Sp$  пропорционально возрастает расход инструмента, использование подачи свыше 4 мкм/имп нецелесообразно.

При  $Sp = 4$  мкм/имп силы  $P_y$  и  $P_z$  по сравнению с периодической правкой снизились соответственно в 2,4 и 3,5 раза.

При шлифовании титановых сплавов правка наибольшее влияние оказывает на силу  $P_z$ , с ростом  $Sp$  изменяется соотношение между составляющими: на  $Sp = 0$  мкм/имп  $P_z/P_y = 1,16$ , с увеличением  $Sp$  до 4-6 мкм/имп  $P_z/P_y = 0,86 - 0,80$ .

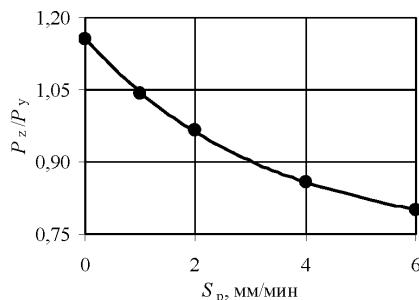


Рисунок 2 – Влияние подачи алмазного ролика  $Sp$  на соотношение  $P_z/P_y$

С увеличением глубины шлифования составляющие силы резания также возрастают. Зависимость сил от глубины шлифования аппроксимирована степенной функцией.

При шлифовании на глубине 0,1 - 0,3 мм дефектов на поверхности образцов не наблюдалось. При шлифовании с глубиной 0,4 мм на образцах обнаружены прижоги в месте контакта заготовок.

Исследования, выполненные на электронном микроскопе Versa 3D, показали, что при шлифовании без правки круга значительная часть обработанной поверхности покрыта слоем неоднородного налипшего металла (рис. 3а). В процессе контакта налипшего металла с вершинами абразивных зерен на его поверхности образовываются трещины различных форм (рис. 3б). При наклоне электронной колонны относительно вертикали на угол  $\alpha=52^\circ$  при увеличении  $\times 50000$  между основной поверхностью и налипшим металлом обнаружена щель с начальным зазором около 1 мкм (рис. 3в).

При увеличении  $\times 25000$  в месте скола зерен обнаружены включения, поверхность которых может свидетельствовать об их кристаллическом строении (рис. 3г). Результаты микрорентгеноспектрального анализа показали наличие в кристаллах оксида алюминия и углерода, что позволяет считать их кристаллами оксида алюминия.

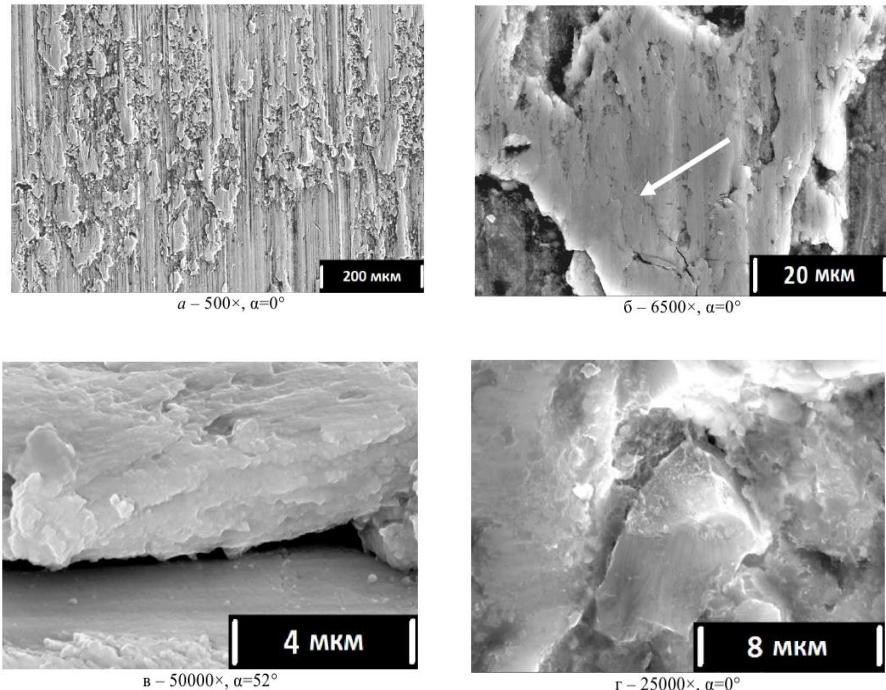


Рисунок 3 – Рельеф обработанной поверхности титанового сплава при шлифовании без постоянной правки круга

При шлифовании с постоянной правкой абразивного инструмента алмазным роликом рельеф обработанной поверхности достаточно чистый, массового налипания металла нет.

## Выводы

Образование прижога на обработанной поверхности определяется некоторым предельным значением  $Pzmax$  и зависит от условий обработки.

Установлено, что предельное значение  $Pzmax$  возрастает в пропорции приблизительно 3 % на каждые 10 мм/мин роста  $Vs$  с увеличением скорости подачи стола;  $Pzmax$  возрастает в среднем на 35 % с уменьшением зернистости от 32 до 16 мкм.

Определена зависимость отношения сил  $Pz/Py$  от зернистости и увеличения скорости подачи правящего ролика.

При шлифовании без правки круга обработанная поверхность титанового сплава покрыта неоднородным слоем налипшего металла, в отдельных участках которого обнаружены включения, характеризуемые как кристаллы оксида алюминия.

**Список использованных источников литературы 1.** Саютин Г. И., Носенко В. А. Шлифование деталей из сплавов на основе титана. – М.: Машиностроение, 1987. – 80 с. **2.** Силин С.С. Особенности глубинного шлифования титановых сплавов // С.С. Силин, Б.Н. Леонов, В.А. Хрульков, А.В. Лобанов, В.А. Полетаев, Э.Б. Данченко // Вестник машиностроения, 1989, №1. – С. 43-45. **3.** Носенко В.А. Критерий интенсивности взаимодействия обрабатываемого и абразивного материалов при шлифовании / В.А. Носенко // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2001. – № 5. – С. 85. **4.** Полетаев В.А. Глубинное шлифование лопаток турбин: библиотека технолога / В.А. Полетаев, Д.И. Волков. – М.: Машиностроение, 2009. – 272 с. **5.** Старков В.К. Шлифование высокопористыми кругами. – М.: Машиностроение, 2007. – 688 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Sayutin G. I., Nosenko V. A. Shlifovanie detaley iz splavov na osnove titana. – M.: Mashinostroenie, 1987. – 80 s. 2. Silyn S.S. Osobennosti glubinnogo shlifovaniya titanovyih splavor // S.S. Silyn, B.N. Leonov, V.A. Hrulkov, A.V. Lobanov, V.A. Poletaev, E.B. Danchenko // Vestnik mashinostroeniya, 1989, No 1. S. 43-45. 3. Nosenko V.A. Kriteriy intensivnosti vzaimodeystviya obrabatyvayemogo i abrazivnogo materialov pri shlifovanii / V.A. Nosenko // Problemyi mashinostroeniya i nadezhnosti mashin. 2001. – No 5. – S. 85. 4. Poletaev V.A. Glubinnoe shlifovanie lopatok turbin: biblioteka tehnologa / V.A. Poletaev, D.I. Volkov – M.: Mashinostroenie, 2009. – 272 s. 5. Starkov V.K. Shlifovanie vyisokoporistyimi krugami. – M.: Mashinostroenie, 2007. – 688 s.

УДК 621.3.095.221

Б.А. Алексенко, Харьков, Украина

## СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ОБЪЕМЕ КАМЕРЫ СВЧ

Побудований випробувальний стенд для вивчення поширення електромагнітного поля в камерах різних конструкцій. Проведена серія експериментів по вимірюванню напруженості електромагнітного поля з метою визначення рівномірності розподілу енергії в обсязі камери СВЧ нагрівача із застосуванням різних вимірювальних систем. Практично підтверджена працездатність і безпеку розроблених систем вимірювання.

**Ключові слова:** електромагнітне поле, СВЧ нагрівач

Построен стенд испытательный для изучения распространения электромагнитного поля в камерах различных конструкций. Проведена серия экспериментов по измерению напряженности электромагнитного поля с целью определения равномерности распределения энергии в объеме камеры СВЧ нагревателя с применением различных измерительных систем. Практически подтверждена работоспособность и безопасность разработанных систем измерения.

**Ключевые слова:** электромагнитное поле, СВЧ нагреватель

*A test stand has been constructed to study the propagation of the electromagnetic field in chambers of various designs. A series of experiments was conducted to measure the intensity of the electromagnetic field in order to determine the uniformity of the energy distribution in the volume of the microwave oven chamber using various measuring systems. Practically, the working capacity and safety of the developed measurement systems have been confirmed.*

**Keywords:** electromagnetic field, microwave heater

### Введение

Применение микроволнового излучения с целью десорбции влаги с поверхности молекулярных сит в процессе получения осушенного сжатого воздуха является перспективной задачей в процессе разработки адсорбционных осушителей. При этом один из основных вопросов проектирования – это создание эффективной камеры СВЧ, конфигурация которой обеспечивает наиболее равномерное распределение электромагнитной энергии в объеме, что ускоряет процесс сушки, минимизируя обратное отражение энергии и способствуя интенсификации процесса десорбции.

Основной проблемой при оценке эффективности камеры СВЧ является невозможность оценить равномерность распределения электромагнитной энергии в камере, так как непосредственное внедрение датчиков в заданную пространственную координату камеры или в зону нагрева испытуемого материала во время воздействия СВЧ излучения не является возможным. Это

вызвано тем, что под действием СВЧ излучения в металлических проводниках возникают вихревые токи. В этих условиях использование термопар и термисторов для измерения температуры затруднительно из-за высокого уровня шумов. Также применение датчиков бесполезно, если сигнал от них не может быть получен за пределами камеры СВЧ, а содержащаяся в этом сигнале информация обработана и индицирована.

Теоретически, вывод информации из камеры, в которой нагрев и осушка производятся с применением энергии СВЧ, может быть организован через различные отверстия и прорези в её стенках, неплотности прилегания крышек и лючков. Как правило, стенки камеры содержат некоторое количество диафрагм, т. е. отверстий, выполненных в радионепрозрачной перегородке, толщина которой  $\rightarrow 0$ . Диафрагмы предназначены для конвекции воздуха и вывода из полости камеры приводных систем. Расчету поля, проникающего сквозь диафрагмы, посвящено отдельное исследование. Теоретический расчет, результаты моделирования и практических исследований [1] показывают, что излучение, превышающее допустимый уровень, возникает когда диаметр круглой диафрагмы составляет порядка 15 ... 20 мм. Поле, возбуждаемое круглой диафрагмой, пропорционально кубу её радиуса. Так как излучение из нескольких диафрагм примерно пропорционально их числу, то замена одной диафрагмы с большим радиусом несколькими малыми, с той же суммарной площадью поперечного сечения, приводит к ослаблению поля в  $\sqrt{n}$  раз [6, 7]. Данное явление практически используется при проектировании окон в камерах микроволновых нагревателей, осушителей и печей бытового и промышленного назначения.

Поскольку, как в процессе проведения экспериментов, так и в процессе эксплуатации устройств промышленного назначения, в непосредственной близости от оборудования предполагается присутствие обслуживающего персонала, важно знать, при каких условиях обеспечивается достаточное экранирование камеры. В случае, если необходимо выполнить отверстие в стенке камеры с целью вывода информации от датчика, возникает вопрос о том, будет ли данная камера обладать необходимыми радиоизоляционными свойствами. Важнейшим обстоятельством, существенно ограничивающим возможность применения выносных датчиков и усложняющим процесс снятия показаний, также является то, что в случае размещения в непосредственной близости от диафрагм каких-либо проводящих материалов, происходит значительное повышение излучения сквозь диафрагму. В особенности интенсивно данное явление проявляется, если сквозь диафрагму проходит отрезок проводника. В данном случае диафрагма превращается в излучатель в виде отрезка коаксиального волновода, для которого не существует ограничения излучения по диаметру диафрагмы, и излучаемая мощность увеличивается в несколько сот раз, причиняя вред здоровью находящегося в непосредственной близости персонала. По данной

причине, в правила безопасности, выработанные мировой практикой в процессе конструирования, постройки и эксплуатации устройств, использующих микроволновое излучение, включены следующие неотъемлемые пункты: запрещается включение СВЧ камеры при наличии неплотности прилегания ограждающих элементов камеры, дверцы, лючков и заглушек, а также при повреждении перфорированных диафрагменных сеток; запрещается делать дополнительные отверстия в корпусе камеры без предварительных расчетов и испытаний, какими бы целями это не мотивировалось; запрещено вводить в отверстия диафрагм какие бы то ни было токопроводящие предметы – провода, элементы крепежа, ртутные термометры и. т. п.

В процессе проведения экспериментов на частоте 2,45 ГГц, проникновение излучения внутрь ткани человеческого тела составляет несколько сантиметров, при том, что производимый им нагрев ощущается при плотности мощности  $W_s = 20 \dots 50 \text{ мВт/см}^2$  в течение нескольких секунд. Опасность данного облучения заключается в возможности получения внутренних ожогов, которые могут быть гораздо более опасными, по сравнению с ожогами наружными, поскольку человеческий организм к ним менее приспособлен. При достижении внутренними тканями тела температуры выше  $+43^\circ\text{C}$  в организме наступают изменения необратимого характера. Минимальная плотность излучения при этом составляет  $W_{nr} = 20 \text{ мВт/см}^2$ . Мощность на уровне  $W_n < 2 \text{ мВт/см}^2$  считается безопасной.

В настоящее время в мире существует два основных стандарта на уровень безопасного излучения. Один из них разработан Американским Национальным Институтом Стандартов (ANSI) и предлагает считать безопасным излучение с плотностью мощности  $W_{ANSI \ save} = 10 \text{ мВт/см}^2$ . Для установок, использующих СВЧ излучение, стандартом является плотность мощности  $W_{ANSI \ 5cm} = 1 \text{ мВт/см}^2$  на расстоянии 5 см от корпуса оборудования.

Европейский стандарт предполагает считать безопасным излучение с плотностью мощности  $W_{ES \ save} = 0,01 \text{ мВт/см}^2$  на расстоянии 50 см от корпуса оборудования. Причиной послужили исследования по нетепловому воздействию микроволн на живые организмы, в особенности на нервную систему. Эффект нетеплового воздействия на биологические объекты до конца не изучен, предполагается, что при этом происходят изменения в свойствах макромолекул и нервных мембран.

Исходя из вышесказанного ясно, что для безопасного вывода данных из камеры СВЧ требуется разработка специальных систем измерения, и, в любом случае, при работе с указанным оборудованием необходимо измерять и контролировать уровень излучения в непосредственной близости от камеры СВЧ.

## Анализ последних исследований и литературы

В настоящее время не имеется отработанной технологии определения равномерности распределения мощности СВЧ в камере нагревателя. Существует ряд стандартов, позволяющих оценить равномерность нагрева в численной форме. При этом, любой стандарт определяет её лишь приближенно, тем более, что равномерность нагрева величина не постоянная, а зависит от вида и количества нагреваемого в камере материала.

В соответствии с НВН-100 ГОСТ 19308-80, для определения равномерности нагрева на дно камеры устанавливают 5 ёмкостей, содержащих  $100 \pm 3$  мл водопроводной воды. Ёмкости располагаются так, как показано на рисунке (см. рис. 1).

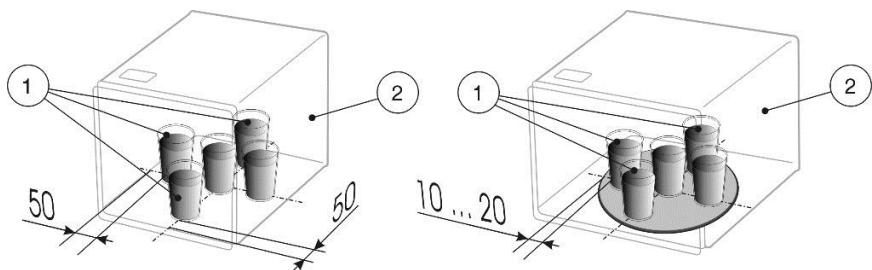


Рисунок 1 – Определение равномерности нагрева

Температура воды, которая не должна превышать  $+20$  °С, измеряется с использованием ртутного термометра с ценой деления  $0,1$  °С. После этого производится включение СВЧ нагрева на период длительностью 2 мин. Затем в течение не более 15 сек. вода в ёмкостях подвергается перемешиванию, и её конечная температура измеряется.

Коэффициент равномерности определяется по формулам:

$$k = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [\Delta t_c - \Delta t_i]}{\sum_{i=1}^n \Delta t_i} \quad (1)$$

$$\Delta t_c = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta t_i}{n} \quad (2)$$

$$\Delta t_i = t_{is} - t_{ie} \quad (3)$$

где:  $k$  – коэффициент равномерности;  $t_{is}$  – температура воды в  $i$ -й ёмкости до нагрева [°C];  $t_{ie}$  – температура воды в  $i$ -й ёмкости после нагрева [°C];  $n = 5$  – количество ёмкостей;  $\Delta t_i$  – температурный прирост в  $i$ -й ёмкости после нагрева [°C];  $\Delta t_c$  – усредненный температурный прирост [°C].

Отраслевой стандарт ОСТ 11 0367-83 утверждает, что коэффициент равномерности должен быть не менее 0,7. Хорошо спроектированные и построенные нагреватели имеют коэффициент равномерности более 0,9.

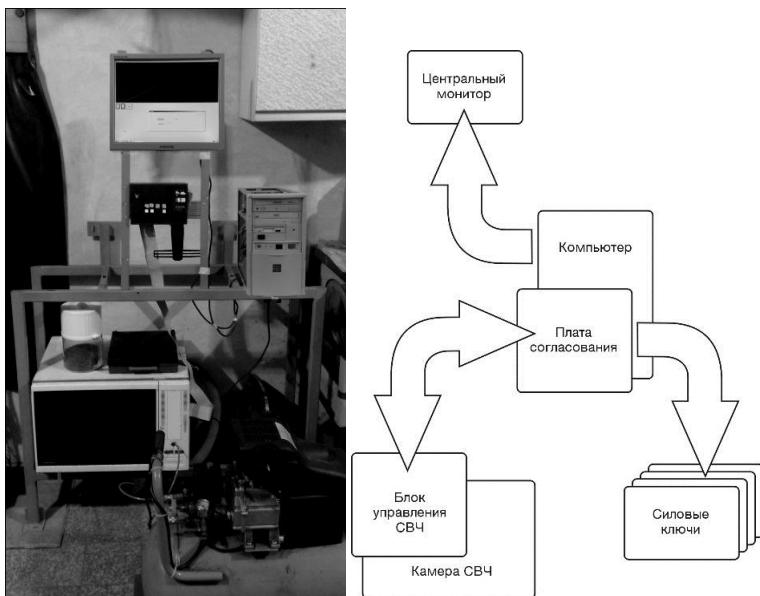


Рисунок 2 – Стенд испытательный, общий вид и структурная схема

В случае применения камеры СВЧ в конструкции осушителя, данная методика определения коэффициента равномерности нагрева непригодна, поскольку адсорбент является сыпучим веществом, фрагментарное извлечение которого из камеры с целью точного измерения температуры в различных зонах нагрева невозможна. Также на равномерность нагрева существенное влияние оказывает общая масса и размещение осушаемого адсорбента в объеме камеры, что делает необходимым применение датчиков внутри камеры СВЧ и непосредственно в массе осушаемого материала.

Известны экспериментальные работы [2], в ходе которых для измерения температуры нагреваемого вещества применялось волоконно-оптическое измерение температуры DTS (Distributed Temperature Sensing), заключающееся в использовании оптоэлектронных приборов для измерения температуры, в котором стеклянные волокна, не абсорбирующие энергию микроволн, служат в качестве линейных датчиков. Измерения температуры проводились на различном расстоянии от внешней поверхности испытуемого цилиндрического образца диаметром 41 мм. Для повторного использования термочувствительных элементов они помещались в тонкие стеклянные трубки, из которых датчики могли извлекаться без повреждений.

Волоконно-оптический датчик представляет собой небольшое по размерам устройство, в котором оптическое волокно используется как в качестве линии передачи данных, так и в качестве чувствительного элемента, способного детектировать изменения различных величин. Стандартные волоконно-оптические датчики выпускаются с размерами от  $\varnothing$  0,5 мм до  $\varnothing$  15 мм, в корпусах цилиндрической или прямоугольной формы и пригодны для эксплуатации при температуре до +400 °C.

Элементы, используемые в волоконно-оптических датчиках, являются абсолютно пассивными по отношению к электричеству, невосприимчивы к электромагнитным наводкам и помехам, что позволяет применять их в оборудовании СВЧ. Однако это же обстоятельство делает данный тип датчиков абсолютно непригодным для определения уровня электромагнитного поля.

### **Постановка проблемы исследования**

Высокая цена волоконно-оптических датчиков, невозможность детектировать наличие и измерять интенсивность электромагнитного поля в камере и за её пределами, а также непосредственно в объеме нагреваемого материала, накладывают ограничения на их использование при измерении интенсивности СВЧ излучения.

## Формулировка целей исследования

Создание систем измерения, способных детектировать наличие и измерять интенсивность электромагнитного поля в камере СВЧ и за её пределами, как в объеме осушаемого материала, так и без помещения в полость камеры осушаемого адсорбента является целью настоящего исследования.

## Материалы исследования

С целью получения опытных данных и проведения экспериментальной проверки теоретических расчетов построен испытательный стенд (см. рис. 2.), способный моделировать поведение адсорбирующего вещества в условиях реального технологического процесса и позволяющий производить испытания камер СВЧ с различной конфигурацией, независимо от количества осушаемого адсорбента и его размещения в полости камеры.

В процессе постройки стенда были разработаны и включены в его состав три системы измерения интенсивности СВЧ излучения.

Первая система измерения и сигнализации предназначена для измерения уровня напряженности электромагнитного поля за пределами камеры СВЧ и сигнализации о превышении уровня выше безопасного. Система представляет собой группу из трех независимых измерителей интенсивности СВЧ излучения. Каждый из датчиков представляет собой электронные и механический вольтметр, подключенный через выпрямитель к рамочной кольцевой антенне (см. рис. 3). Использованы электронные и механический типы вольтметров.

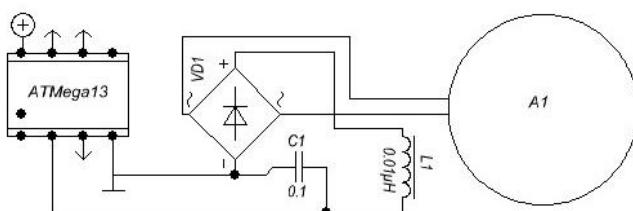


Рисунок 3 – Схема принципиальная. VD1 – выпрямитель, A1 – антenna

При достижении уровня измеряемого параметра выше установленного, согласно ГОСТ, электронные вольтметры, реализованные на АЦП микроконтроллера ATmega13, выдают управляющий сигнал, который

формирует звуковое предупреждение об опасном уровне напряженности СВЧ излучения на расстоянии 50 см от камеры СВЧ испытательного стенда. Датчик с вольтметром механического типа (см. рис. 4) использован по причине лучшей помехозащищенности и независимости от подключения источнику электропитания стенда. Включение звукового предупреждения происходит путем механического замыкания стрелкой вольтметра контактов звукового извещателя с автономным питанием от гальванического элемента.



Рисунок 4 – Датчик с вольтметром механического типа

Вторая система измерения, используемая для выявления наличия электромагнитного поля в камере СВЧ и измерения его интенсивности представляет собой систему сенсоров на основе неоновых ламп, подключенных к симметричным дипольным антеннам (см. рис. 5).

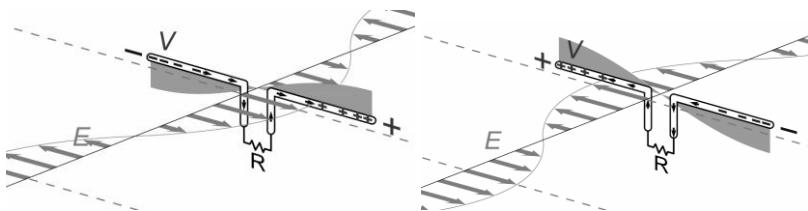


Рисунок 5 – Дипольная антенна и принцип её действия в электромагнитном поле

Каждая из ламп установлена на одном из концов световода, проходящего через диафрагму в стенке камеры СВЧ, и вторым своим концом соединенного с аналоговым фотоприемником. В процессе работы камеры СВЧ, излучение, воздействующее на антенну (см. рис. 6, 7) в месте установки датчика, вызывает свечение лампы с яркостью, пропорциональной уровню

напряженности электромагнитного поля. Информация об интенсивности излучения, т. е. о яркости свечения лампы, передается за пределы камеры СВЧ с использованием световода, изготовленного из элемента оптоволоконного бытового светильника IA904 P50. Материал световода характеризуется свойством нулевой электропроводности и, таким образом, не вызывает вторичного излучения за пределами камеры СВЧ. В числовую форму информация об уровне напряженности электромагнитного поля преобразуется с использованием АЦП микроконтроллера ATMega8, обрабатывающего аналоговый сигнал от соответствующего фототранзистора, построенного на базе фототранзистора, который установлен на противоположном конце волновода (см. рис. 6)

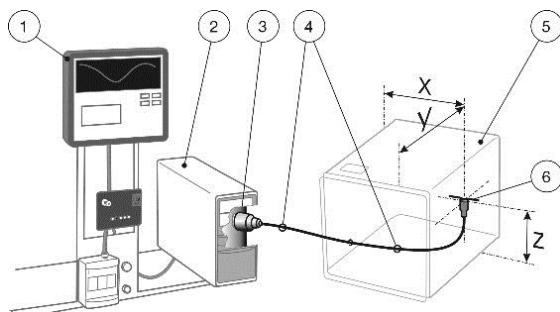


Рисунок 6 – Система измерения напряженности электромагнитного поля

1 – монитор системы управления; 2 – система управления;

3 – фототранзистор; 4 – световод; 5 – камера СВЧ;

6 – лампа со смонтированной дипольной антенной, размещенная в координате x, y, z

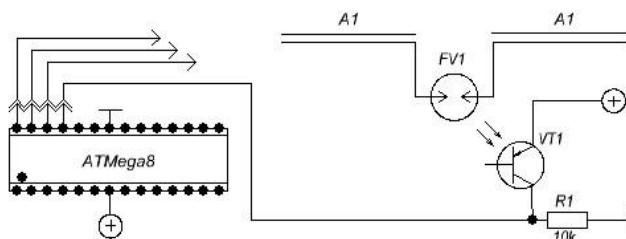


Рисунок 7 – Схема принципиальная  
FV1 – лампа, VT1 – фототранзистор, A1 – антenna

В ходе эксперимента, проведенного с использованием данной системы, лампа со смонтированной дипольной антенной размещалась в камере СВЧ в координате А, затем в координате Б, (см. рис. 10, поз. 3), после чего производилась оценка напряженности электромагнитного поля по уровню сигналов, принятых и обработанных системой управления.

Данные, полученные при проведении эксперимента хорошо коррелируют с результатами, полученными в процессе математического моделирования камеры СВЧ нагревателя, применяя ПО [3], использующее при построении модели метод конечных элементов (см. табл. 1).

Таблица 1

Напряженность электромагнитного поля, [В/м], рассчитанная при помощи:	Координата размещения	
	А	Б
математической модели	3,18E+03	2,63E+03
экспериментальных замеров при проведении эксперимента, [В/м]	3,60E+03	2,20E+03

Третья система измерения предназначена для косвенной оценки уровня микроволнового излучения, используя информацию об интенсивности нагрева материала, помещаемого в заданной координате внутри камеры СВЧ. Система представляет собой кольцевой трубопровод, в котором циркулирует нагреваемая жидкость, интенсивность нагрева которой позволяет оценить уровень напряженности электромагнитного поля в заданной координате камеры СВЧ. Система состоит (см. рис. 8) из теплоприёмника спирального типа, накопительной ёмкости, мерного перекачивающего насоса, терморезисторного датчика, соединительных трубопроводов и циркулирующей жидкости.

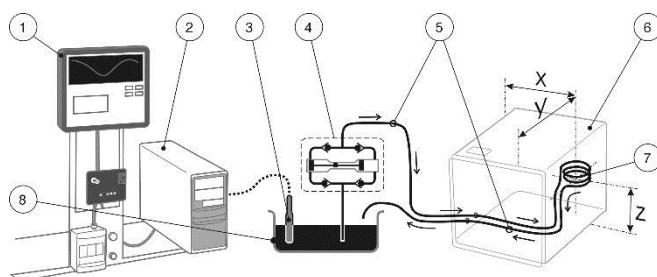


Рисунок 8 – Система измерения напряженности электромагнитного поля

- 1 – дисплей системы управления;
- 2 – система управления;
- 3 – датчик терморезисторный;
- 4 – перекачивающий насос;
- 5 – трубопроводы;
- 6 – камера СВЧ;
- 7 – теплоприёмник размещенный в координате x, у, z;
- 8 – накопительная ёмкость

Трубопроводы представляют собой силиконовые трубы, способные без значительных деформаций выдерживать температуру протекающей среды до +180 °C. Теплоприемник также выполнен из силиконовых трубок, закрепленных на пластиковом держателе, и представляет с подводящим и отводящим трубопроводом одно целое. В месте входа и выхода их камеры СВЧ трубопроводы сужены до диаметров диафрагм в стенке камеры СВЧ. Мерный перекачивающий насос (см. рис. 9), изготовленный при создании системы, служит для обеспечения циркуляции жидкости с одновременной оценкой интенсивности циркуляции. Насос состоит из двух гидравлических цилиндров с заданной емкостью, служащих для перекачивания жидкости, и двух приводящих пневматических цилиндров, обеспечивающих синхронное перемещение поршней гидравлических цилиндров из одного крайнего положения в другое.

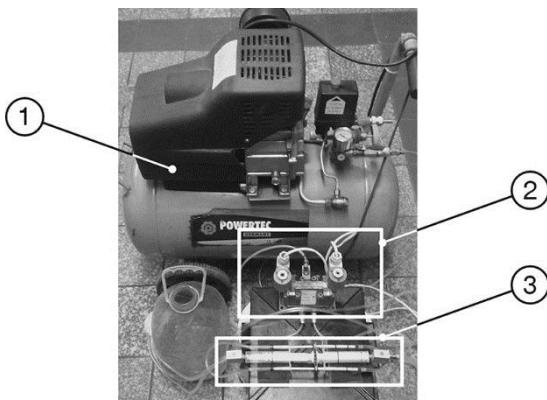


Рисунок 9 – Насос перекачивающий  
1 – компрессор воздушный; 2 – пневматический распределитель;  
3 – блок гидравлических и пневматических цилиндров

Достигая крайних положений, штоки цилиндров воздействуют на фотодатчики, изменяя позицию пятиходового двухпозиционного пневмораспределителя (см. рис. 8, поз. 2), создающего давление в приводящих цилиндрах. Таким образом, насос действует циклически, обеспечивая постоянное давление перекачиваемой жидкости, независимо от изменения её вязкости, что необходимо для обеспечения целостности трубопроводов и теплоприемника. Импульсы от фотодатчиков, воспринимаемые системой управления, используются для расчета производительности перекачивающего насоса в текущий момент времени.

Поток циркулирующей жидкости из накопительной емкости в камере СВЧ и обратно, также, как и в случае с применением полимерного световода, не вызывает вторичного излучения за пределами камеры СВЧ по причине того, что электропроводность материала трубопроводов и циркулирующей жидкости приближаются к нулевой. Это позволяет достоверно и безопасно определять уровень напряженности электромагнитного излучения в процессе проектирования камеры СВЧ. Температура нагреваемого материала измеряется терморезистивным датчиком, помещенным в накопительную ёмкость и выдающим аналоговый сигнал на АЦП микроконтроллера. Напряженность электромагнитного поля в координате установки теплоприемника расчитывается из системы уравнений:

$$P_v = E^2 \omega \epsilon_{\gamma} \epsilon_0 \operatorname{tg} \sigma \quad (4)$$

$$P_v = \frac{P}{V} \quad (5)$$

$$Q = Cm(t_2 - t_1) \quad (6)$$

$$Q = \frac{P}{T} \quad (8)$$

где:  $P_v$  – удельная мощность диэлектрических потерь [ $\text{W/m}^3$ ];  $E$  – напряженность электрического поля [ $\text{В/м}$ ];  $\omega$  – круговая частота [ $\text{сек}^{-1}$ ];  $\epsilon_{\gamma}$  – диэлектрическая проницаемость [ $\Phi/\text{м}$ ];  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  – электрическая постоянная [ $\Phi/\text{м}$ ];  $Q$  – количество теплоты [ $\text{Дж}$ ];  $\operatorname{tg} \sigma$  – тангенс угла диэлектрических потерь;  $P$  – мощность СВЧ [ $\text{W}$ ];  $V$  – объем жидкости, находящейся в полости теплоприемника [ $\text{м}^3$ ];  $C$  – удельная теплоемкость [ $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ];  $m$  – масса циркулирующей жидкости [ $\text{кг}$ ];  $t_2$  и  $t_1$  – соответственно, конечная и начальная температуры нагреваемой жидкости [ $^{\circ}\text{C}$ ];  $T$  – время [ $\text{с}$ ].

Откуда

$$E = \sqrt{\frac{Cm(t_2 - t_1)}{V \omega \epsilon_{\gamma} \epsilon_0 \operatorname{tg} \sigma T k}} \quad (8)$$

где:  $k = 0,8$  — поправочный коэффициент непроизводительных потерь.

С использованием системы были проведены два эксперимента.

В ходе эксперимента № 1, проведенного с использованием данной системы, теплоприёмник с заданным объемом (см. табл. 2) размещался в камере СВЧ в координате А, затем в координате Б, (см. рис. 10, поз. 2), после чего производился расчет напряженности электромагнитного поля в координатах по значениям температур (см. табл. 4).

В ходе эксперимента № 2 теплоприёмник с объемом (см. табл. 2) размещался в камере СВЧ в координате А, (см. рис. 10, поз. 2), после чего производился расчет напряженности электромагнитного поля в координатах по значениям температур (см. табл. 4).

Данные, полученные при проведении экспериментов, хорошо коррелируют с результатами, полученными в процессе математического моделирования методом конечных элементов (см. табл. 3).

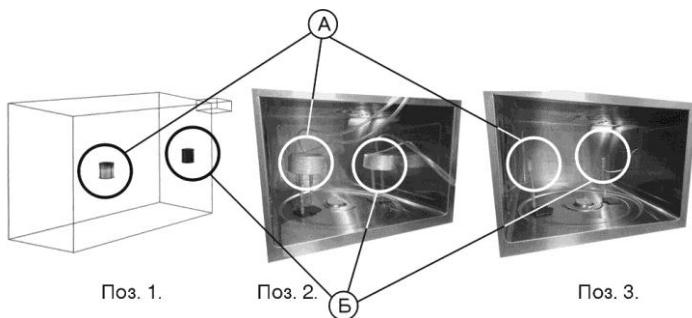


Рисунок 10 – Поз. 1 – компьютерная модель; поз. 2 – система косвенного измерения интенсивности СВЧ; поз. 3 – система прямого измерения интенсивности СВЧ; А – размещение датчика в координате А; Б – размещение датчика в координате Б

Таблица 2

Характеристика жидкости, циркулирующей в системе измерения		
Параметр	Значение	[СИ]
Круговая частота	$2\pi \cdot 2,45 \cdot 10^9$	[сек <sup>-1</sup> ]
Диэлектрическая проницаемость	78	[Ф/м]
Тангенс угла диэлектрических потерь	0,11	
Удельная теплоемкость	76,07	[Дж/(кг·К)]
Объем полости теплоприемника при проведении эксперимента №	1 2	1,5E-05 6,5E-06 [м <sup>3</sup> ]
Масса циркулирующей жидкости	0,8	[кг]
Мощность СВЧ, согласно	500	[Вт]
Продолжительность эксперимента	60	[сек]

Таблица 3

Напряженность электромагнитного поля, [В/м], расчитанная при помощи: математической модели	Координата размещения	
	A	Б
экспериментальных замеров при проведении эксперимента №:	1	3,18E+03
	2	2,46E+03

Таблица 4

Температура циркулирующей жидкости, °C	Координата размещения	
	A	Б
До проведения экспериментов	+20	
После проведения эксперимента №1:	+89	+80
После проведения эксперимента №2:	+55	—

### Выводы и перспективы

Оборудование испытательного стенда системами измерения, служащих для выявления наличия электромагнитного поля в камере СВЧ и измерения его интенсивности как непосредственно, так и путем использования информации об интенсивности нагрева материала за счет воздействия поля СВЧ, позволяет проводить экспериментальную работу по созданию эффективной камеры СВЧ, оценивать равномерность нагрева материала, оперативно вносить конструктивные изменения по улучшению эффективности поглощения электромагнитной энергии в нагреваемом материале.

Получены данные об уровне напряженности электромагнитного поля в нагревательной камере прямоугольной формы, об интенсивности нагрева адсорбента типа КСМГ с использованием СВЧ излучения.

С использованием системы сигнализации, предназначенной для измерения уровня напряженности электромагнитного поля за пределами камеры СВЧ и сигнализации о его превышении, подтверждена безопасность оборудования, выполняющего десорбцию молекулярных сит с использованием СВЧ излучения.

**Список использованной литературы.** 1. *Sophocles J. Orfanidis*. Electromagnetic Waves and Antennas [Электронный ресурс]. – Rutgers University Department of Electrical and Computer Engineering, 2016. Загл. с тит. экрана. Электрон. версия печ. публикации. – Систем. требования: Adobe Reader. URL: <http://www.ece.rutgers.edu/~orfanidi/ewa/ewa-2up.pdf> (дата обращения: 10.02.2017). 2. *Резник С.В., Румянцев С.А.* Математическое моделирование температурного состояния цилиндрических заготовок из полимерных композиционных материалов при СВЧ нагреве. Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, М, Электронный научно-технический журнал, 01.01.14. – URL: [www.technomag.bmstu.ru/doc/658448.html](http://www.technomag.bmstu.ru/doc/658448.html) (дата обращения: 10.02.2017). 3. *Банков С.Е., Курушин А.А., Разевиг В.Д.* Анализ и оптимизация трехмерных СВЧ структур с помощью HFSS. Под ред. д.т.н., проф. *Банкова С.Е.* – М., СОЛОН-Пресс, 2004, – 208 с. 4. HFSS – High Frequency Structure Simulation. Manuals, Ansoft, 2004. – URL: [www.ansoft.com](http://www.ansoft.com) (дата обращения: 10.02.2017). 5. ECE-329 Fields and Waves I. 21. Monochromatic waves and phasor notation // Phasor form of Maxwell's equations and damped waves in conducting media: Lecture Notes / ECE ILLINOIS Department of Electrical and Computer Engineering. [Электронный ресурс] Загл. с тит. экрана. Электрон. версия печ. публикации. – Систем. требования: Adobe Reader. URL: <http://jsa.ece.illinois.edu/ece329/notes/329lect21.pdf> (дата обращения: 10.02.2017). 6. *K.A. Balanis*. Antenna Theory: Analysis and Design, Wiley & Sons, 2 nd edition, 1997, 942 pp. 7. *Солов'янова И.П.* Теория волновых процессов. Электромагнитные волны: учебное пособие // *И.П. Солов'янова, М.П. Наймушин*. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ – УПИ, 2005. – 131 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. *Sophocles J. Orfanidis*. Electromagnetic Waves and Antennas [Jelektronnyj resurs]. – Rutgers University Department of Electrical and Computer Engineering, 2016. Zagl. s tit. jekrana. Jelektron. versija pech. publikacii. – Sistem. trebovaniya: Adobe Reader. URL: <http://www.ece.rutgers.edu/~orfanidi/ewa/ewa-2up.pdf> (data obrashhenija: 10.02.2017). 2. *Reznik S.V., Rumjancev S.A.* Matematischeskoje modelirovanie temperaturnogo sostojanijacilindricheskikh zagotovok iz polimernyh kompozicionnyh materialov pri SVCh nagreve. Rossija, MGTU im. N.Je. Baumana, 105005, M, Jelektronnyj nauchno-tehnicheskij zhurnal, 01.01.14. – URL: [www.technomag.bmstu.ru/doc/658448.html](http://www.technomag.bmstu.ru/doc/658448.html) (data obrashhenija: 10.02.2017). 3. *Bankov S.E., Kurushin A.A., Razevig V.D.* Analiz i optimizacija trehmernyh SVCh struktur s pomoshhju HFSS. Pod red. d.t.n., prof. *Bankova S.E.* – M., SOLON-Press, 2004, – 208 s. 4. HFSS – High Frequency Structure Simulation. Manuals, Ansoft, 2004. – URL: [www.ansoft.com](http://www.ansoft.com) (data obrashhenija: 10.02.2017). 5. ECE-329 Fields and Waves I. 21. Monochromatic waves and phasor notation // Phasor form of Maxwell's equations and damped waves in conducting media: Lecture Notes / ECE ILLINOIS Department of Electrical and Computer Engineering. [Jelektronnyj resurs] Zagl. s tit. jekrana. Jelektron. versija pech. publikacii. – Sistem. trebovaniya: AdobeReader URL: <http://jsa.ece.illinois.edu/ece329/notes/329lect21.pdf> (data obrashhenija: 10.02.2017). 6. *K.A. Balanis*. Antenna Theory: Analysis and Design, Wiley & Sons, 2 nd edition, 1997, 942 pp. 7. *Solov'janova I.P.* Teoriya volnovykh processov. Jelektromagnitnye volny: uchebnoe posobie // I.P. Solov'janova, M.P. Najmushin. – Ekaterinburg: GOU VPO UGTU – UPI, 2005. – 131 s.

УДК 004.056.5

И.И. Борисенко, Одесса, Украина

## ГРАФОВАЯ МОДЕЛЬ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ СТЕГАНОКОНТЕЙНЕРА І АНАЛІЗ СОСТОЯНІЯ ЕГО ЗАЩИЩЕННОСТИ

Представлена математическая модель стеганоконтейнера (СК), которая дает возможность оценить его устойчивость к предполагаемой атаке. В качестве инструмента для анализа реакции СК на атаку в графовой модели используется спектр матрицы смежности графа «СК - противник». Разработан метод, позволяющий выполнить анализ возмущений, возникающих при внедрении сообщений различными стеганографическими алгоритмами, что дает возможность сравнивать их эффективность. Приведены результаты вычислительного эксперимента, подтверждающие эффективность предложенного метода.

**Ключові слова:** математическая модель стеганоконтейнера, анализ возмущений

Представлено математичну модель стеганоконтейнера (СК), яка дає можливість оцінити його стійкість до імовірного нападу. В якості інструмента для аналізу реакції СК на напад в графовій моделі використовується спектр матриці суміжності графа «СК - супротивник». Розроблено метод, який дозволяє виконати аналіз збурень, які виникають під час вбудовування повідомлень різними стеганографічними алгоритмами, що дає можливість порівнювати їх ефективність. Наведено результати обчислювального експерименту, які підтверджують ефективність запропонованого методу.

**Ключові слова:** математична модель стеганоконтейнера, аналіз збурень

The mathematical model of stego - image (SI) are presented to estimate it noise stability to assumption attack. In the graph model is used the spectrum of adjacency matrix of graph "SI - adversary" for analysis the reaction SI on an attack. The metod allowing to make the analysis of the perturbations, arising in case of embedding of messages different steganografic algorithms, that gives the opportunity to compare their efficiency is constructed. The results of numerical experiment confirm the efficiency of the proposed method.

**Keywords:** mathematical model of stego - image, analysis of the perturbations

### Введение

В настоящее время в рамках вычислительных сетей проводится активный оперативный обмен различной медийной информацией в виде звука, изображений, видео между участниками сетевых сеансов независимо от их территориального размещения, поэтому такие информационные потоки широко используются в качестве контейнеров для пересылки секретной информации (СИ) в открытой информационной среде. Контейнер со встроенной секретной информацией (в дальнейшем *стеганоконтейнер*) при пересылке или хранении может подвергнуться атакам непреднамеренным (шумы в канале связи) или преднамеренным (атаки конкурентов, заинтересованных лиц). В любом случае в дальнейшем объекты, субъекты,

события, ставшие причиной нарушения целостности стеганоконтейнера (СК), будем называть – *противник*. Понятно, что чем больше атакующее воздействие, тем большая степень разрушения СК вплоть до его уничтожения. Будем считать, что, атакуя СК, противник не намерен себя обнаружить, т.е. атакующее воздействие должно быть таким, при котором обеспечивается надежность восприятия – атака зритально не заметна.

Универсальных систем и средств защиты информации (СЗИ) на все случаи не существует, т.к. каждая защита создается для конкретной информационной системы, ее окружения и внешней среды, под конкретные угрозы, функциональные требования и требования гарантии защиты [1]. При их изменении система защиты должна быть способной адаптироваться к ним. В связи с этим очень важным становится вопрос, к каким атакам СК будет устойчивым, а к каким нет.

### **Цель статьи и постановка задач**

Целью данной работы является разработка графовой модели СК, дающая возможность за счет учета различий в результатах воздействия атаки на СК, сформированного различными стегоалгоритмами, выбрать наиболее устойчивый из них в зависимости от предполагаемой возможной атаки.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) определить структурные элементы СК для построения его графовой модели;
- 2) построить граф противника и формализовать атакующее воздействие на СК;
- 3) разработать метод оценки устойчивости СК предполагаемой атаке;
- 4) провести вычислительный эксперимент.

### **Основная часть**

Каким бы образом не выполнялось стеганопреобразование (СП) – пространственной области, частотной или спектра матрицы контейнера, оно неминуемо приведет к изменению значений некоторых (всех) его элементов, что свидетельствует о том, что они являются носителями встроенной информации. Такие элементы будем называть *информационными элементами* (ИЭ). Любая атака, действующая на СК, по-разному отразится на ИЭ: в некоторых из них информация будет разрушена полностью, а для других ИЭ атака окажется безопасной. Атаку будем рассматривать как малые возмущающие воздействия, которые не приводят к нарушению требования надежности восприятия СК. Учет различий в результатах воздействия атаки на ИЭ является важным при разработке стегоалгоритмов (СА), а также при установлении устойчивости СК к предполагаемой атаке.

## 1. Построение графово - матричной модели СК

Будем использовать в качестве модели СК взвешенный граф [2] со структурным отношением «состоять из». Такой принцип был использован для построения графово-матричной модели защищенной информационно-технологической системы [3].

Перейдем непосредственно к построению взвешенного графа-модели СК, представляющего собой дерево.

*Шаг 1.* Определение структурных элементов СК. СК, как информационная система, в целом представляется изолированной вершиной (Рис. 1), не имеющей связей с вершинами подграфа контейнера, который выполняет функции СЗИ: доступа контейнера к информации, циркулирующей в системе нет. Контейнер представляется в виде неперекрывающихся блоков (областей) определенного размера (не обязательно одинаковых), каждому из которых соответствует вершина графа, лежащая во втором уровне корневой структуры. Вершины третьего уровня соответствуют подмножествам элементов контейнера, на которые разбит каждый блок (к примеру блок разбит на восемь подмножеств, обозначенных П1, ..., П8).

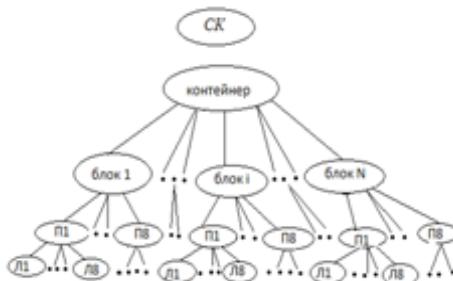


Рисунок 1 – Первоначальный вид графа СК

Каждый последующий уровень представляет собой следующий уровень детализации и определяется выбранным СП. Последний уровень корневой структуры графа представлен элементами контейнера (листья графа), через которые происходит связь с внешней средой и все возможные атаки на СК.

Значения весовых коэффициентов (ВК) листьев взвешенного графа определяются конкретным СА и должны отражать реальную защищенность ИЭ. Вес вершины на каждом уровне корневой структуры графа, кроме последнего (листья), определяется как положительное число, большее или равное сумме весов смежных с ней вершин, находящихся на следующем по порядку уровне корневой структуры.

*Шаг 2.* Построение матрицы смежности  $\overline{Madj}$  взвешенного графа. Поскольку граф неориентированный, его матрица смежности является симметричной.  $\overline{Madj}$  подвергается нормальному спектральному разложению, в результате однозначно определяются ее собственные значения (СЗ) и собственные вектора (СВ) [4].

*Шаг 3.* Введение в построенном графе связи СК-контейнер. В результате СЗИ – контейнер получает доступ непосредственно к СИ. Это приводит к тому, что  $\overline{Madj}$  получает возмущение (в результате получается матрица  $\overline{\overline{Madj}}$ ), а следовательно возмутятся и ее СЗ и СВ. Совокупность возмущений СЗ и СВ является математическим представлением информации, подлежащей защите, которая находится в СК.

## **2. Метод оценки устойчивости СК предполагаемой атаке**

Поскольку матрица  $\overline{Madj}$  симметрична, то ее спектр содержит хорошо обусловленные вещественные СЗ. Хорошая обусловленность СЗ приводит к нечувствительности всего спектра матрицы  $\overline{Madj}$  к возмущающим воздействиям. Иначе говоря, возмущения СЗ по абсолютной величине сравнимы с самим возмущающим воздействием, чего нельзя в общем случае сказать о СВ [3]. Таким образом, об устойчивости СК к предполагаемой атаке, о величине возмущающего воздействия (серьезности атаки), будем судить по величине возмущений СЗ матрицы  $\overline{Madj}$ . Для количественной оценки величины возмущений СЗ будем использовать относительную погрешность:  $\delta = \frac{C3_u - C3_a}{C3_a}$ , где СЗ<sub>u</sub> – СЗ до атаки, СЗ<sub>a</sub> – СЗ после атаки.

Заметим, что, как показывает проведенный вычислительный эксперимент, наибольшую относительную погрешность имеют наименьшие по модулю СЗ, относительная погрешность монотонно уменьшается с увеличением модуля СЗ.

*Шаг 1.* Построение графово - матричной модели противника с матрицей смежности ATAK.

*Шаг 2.* Построение совокупной графово - матричной модели СК и противника. Матрица смежности С совокупной графово - матричной модели является блочно-диагональной:  $C = \begin{pmatrix} \overline{Madj} & 0 \\ 0 & ATAK \end{pmatrix}$ .

Пока противник не оказывает атакующее воздействие на СК, связи между блоками  $\overline{Madj}$  и ATAK отсутствуют (наличие нулевых блоков). Спектр блочно-диагональной матрицы С является объединением СЗ блоков,

т.е. объединение блоков  $\overline{Madj}$  и  $ATAK$  не повлияют на значения СЗ матрицы  $\overline{Madj}$ , в которых находится секретная информация.

*Шаг 3.* Моделирование атаки. Проведение атаки осуществляется появлением ребер между вершинами-листьями графа СК и графа противника. Вес ребер моделирует силу атаки. В результате блочно-диагональная структура матрицы  $C$  будет разрушена появлением связей между элементами блока  $ATAK$  и блока  $\overline{Madj}$ . СЗ матрицы  $\overline{Madj}$  получат возмущения. Итогом атаки является матрица  $\overline{C}$ .

*Шаг 4.* Анализ спектра  $\overline{C}$ . Построить нормальное спектральное разложение матрицы  $\overline{C}$ .

а) если возмущения, которые произошли в ходе моделирования атаки, не затронули те СЗ, в первоначальных возмущениях которых хранится секретная информация, или лишь незначительно возмутили их (результат возмущающего воздействия сравним с шумом округлений), то СК устойчив к предполагаемой атаке. Устойчив также и СА его сформировавший;

б) если условие а) не выполнено то ставится задача выбора СА путем сравнения устойчивости имеющихся в наличии стегоалгоритмов СА<sub>1</sub>, ..., СА<sub>n</sub> к предполагаемой атаке. Для каждого из сформированных стеганоконтейнеров СК<sub>1</sub>, ..., СК<sub>n</sub> следует построить нормальное спектральное разложение их матриц  $\overline{C}_1, \dots, \overline{C}_n$  и вычислить усредненные относительные погрешности  $\delta_{1(cp)}, \dots, \delta_{n(cp)}$ . Наименьшая из  $\delta_{i(cp)}$  соответствует алгоритму, который следует выбрать для формирования СК.

### **3. Практическая реализация предложенного метода**

В [6] представлен стегоалгоритм Stego\_Graph, разработанный для идеального канала связи и обеспечивающий 100% правильно декодируемой информации. Погружение СИ происходит в пространственную область контейнера – изображения, которое предварительно разбивается на блоки, путем корректировки яркости пикселей. Каждый блок содержит восемь информационных элементов. Весовой коэффициент защиты ИЭ определяется как разность между исходным значением яркости и полученным после стегопреобразования.

Пример взвешенного графа-модели СК для одного блока, иллюстрирующий возможное соотношение между весовыми коэффициентами вершин разных уровней, представлен на рис. 2 (рядом с узлом – его номер, внутри узла – его вес).

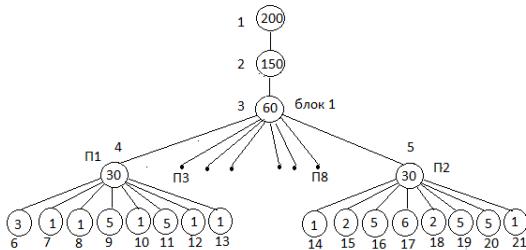


Рисунок 2 – Пример взвешенного графа-модели СК, построенного для одного блока

Матрица смежности  $\bar{G}$  для ветви взвешенного графа, соответствующей подмножеству информационных элементов П1 (Рис. 2) имеет вид:

$$\bar{G} = \begin{bmatrix} 200 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 150 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 60 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 30 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Возмущающие воздействия на СК естественно моделировать при помощи наложения на его матрицу различных шумов. Часто используемой моделью для ошибок квантования, возмущающих воздействий в канале связи и атак на СК является аддитивный гауссовский шум [5].

Атаку будем моделировать в виде аддитивного гауссовского шума с нулевым средним и дисперсией равной 20 (в компьютерной системе MatLab, в которой проводился вычислительный эксперимент нормированное значение дисперсии такого шума равно 0.0003). Такой уровень шума еще не нарушает надежность восприятия СК, но каждый лист графа подвергается атаке. Один из возможных вариантов шума такого уровня в числовом представлении имеет вид: -3, 3, 3, 4, 1, -5, -3, 3, который накладывается на листья с номерами вершин 6 - 13 соответственно (Рис. 2).

Построим графово-матричную модель противника. Между членами последовательности, моделирующей шум, каждому из которых отвечает вершина графа-модели противника, отсутствует какая-либо связь, поэтому ребра между вершинами графа противника отсутствуют и такой граф представляет собой множество изолированных вершин. Поскольку

на СК накладывается шум одного уровня, то все вершины имеют одинаковый вес равный дисперсии, т.е. 20. Матрица такого графа будет диагональной, а ее диагональные элементы равны 20.

Построим совокупную графово - матричную модель СК и противника:

$$C = \begin{pmatrix} \bar{G} & 0 \\ 0 & ATA^T K \end{pmatrix}.$$

Спектр блочно-диагональной матрицы является объединением СЗ блоков. Спектр матрицы  $C$  для рассматриваемого примера состоит из следующих значений:

200.0200	150.0216	60.0485	30.1456	20.0000	20.0000	20.0000	20.0000	20.0000	20.0000
20.0000	20.0000	20.0000	20.0000	<b>5.0005</b>	<b>5.0000</b>	<b>3.0002</b>	<b>1.0010</b>		
<b>1.0000</b>	<b>1.0000</b>	<b>1.0000</b>	<b>1.0000</b>						

Жирным шрифтом выделены СЗ, которые соответствуют вершинам-листьям, т.е. пикселям, которые осуществляют защиту ИЭ.

Атаку осуществляем вводом новых ребер между вершинами графа противника и листьями графа СК, что приведет к появлению новой связи между диагональными элементами блока  $ATAK$  и элементами блока  $\bar{G}$ . Вес ребер определяется гауссовским шумом с параметрами, описанными выше. Итогом атаки является матрица  $\bar{C}$  (Рис. 3). С3 матрицы  $\bar{C}$  выглядят следующим образом:

200.0200 150.0216 60.0485 30.1456 21.5110 20.9980 20.5130 20.4624  
 20.4624 20.4624 20.4593 20.0524 **3.9812** **3.4668** **2.4662** **0.9302** **0.5376**  
**0.5376** **0.5376** **0.4535**

Рисунок 3 – Матричная модель атакованного СК

Как не трудно заметить, СЗ претерпели достаточные возмущения. Относительная погрешность  $\delta$  для СЗ, выделенных жирным шрифтом: 0.2560 0.4423 0.2165 0.0761 0.8601 0.8601 0.8601 1.2051. Усредненная погрешность:  $\delta_{1(cp)} = 0,5970$ .

Для рассматриваемого примера атака, разрушающая защиту всех листьев, выражается реберными весовыми коэффициентами: 3 1 1 5 1 5 1 1 (знак коэффициента не имеет значения, поскольку на возмущение СЗ влияет абсолютная величина коэффициента (Лемма Гершгорина [7] о локализации СЗ)).

Рассмотрим другое подмножество пикселей, с весовыми коэффициентами их защищенности: 1, 2, 5, 6, 2, 5, 5, 1, представляющее подмножество П2. Предпримем ту же атаку. Для построения матричной модели не атакованного и атакованного СК выполним действия, изложенные выше.

Спектр матрицы  $C$ :

$$\begin{array}{cccccccccc} 200.0200 & 150.0216 & 60.0495 & 30.1513 & 20.0000 & 20.0000 & 20.0000 & 20.0000 \\ 20.0000 & 20.0000 & 20.0000 & 20.0000 & \mathbf{5.9792} & \mathbf{5.0000} & \mathbf{5.0000} & \mathbf{4.9338} \\ \mathbf{2.0000} & \mathbf{1.9591} & \mathbf{1.0000} & \mathbf{0.9567} \end{array}$$

Спектр матрицы  $\bar{C}$ :

$$\begin{array}{cccccccccc} 200.0200 & 150.0216 & 60.0497 & 30.1526 & 21.5110 & 21.0600 & 20.5777 \\ 20.5754 & 20.4860 & 20.4624 & 20.4608 & 20.0553 & \mathbf{4.9193} & \mathbf{4.4223} & \mathbf{4.3805} & \mathbf{3.4661} \\ \mathbf{1.9247} & \mathbf{1.4924} & \mathbf{0.5376} & \mathbf{0.4959} \end{array}$$

$$\delta : 0.2155 \quad 0.1306 \quad 0.1414 \quad 0.4234 \quad 0.0391 \quad 0.3127 \quad 0.8601 \quad 0.9292$$

$$\delta_{2(cp)} = 0,3815$$

Сравнивая  $\delta_{1(cp)}$  и  $\delta_{2(cp)}$  можно сделать вывод что подмножество пикселей П2 более предпочтительно для погружения СИ.

Поскольку Stego\_Graph для каждого блока формирует стегопуть по одному и тому же алгоритму, то мы не можем в одном и том же блоке выбирать наилучшие восемь пикселей в смысле их весовых коэффициентов. Поэтому для повышения устойчивости Stego\_Graph было предложено выбрать наиболее подходящие блоки для встраивания СИ, основываясь на значениях их усредненной относительной погрешности. В результате такого подхода была повышена эффективность декодирования СИ в условиях присутствия шума на 15%.

Рассмотрим другой стегоалгоритм Stego\_Graph1 [8]. Этот алгоритм для всех ИЭ обеспечивает весовой коэффициент равный семи. Для Stego\_Graph1 получены следующие результаты:

Спектр матрицы  $C$ :

$$\begin{array}{cccccccccc} 200.0200 & 150.0200 & 60.04151 & 30.1653 & 20.0000 & 20.0000 & 20.0000 & 20.0000 \\ 20.0000 & 20.0000 & 20.0000 & 20.0000 & \mathbf{7.000} & \mathbf{7.000} & \mathbf{7.000} & \mathbf{7.000} & \mathbf{7.000} \\ \mathbf{7.000} & \mathbf{7.000} & \mathbf{6.8147} \end{array}$$

Спектр матрицы  $\bar{C}$ :

$$\begin{array}{cccccccccc} 200.0200 & 150.0200 & 60.04151 & 30.1668 & 21.6971 & 21.1297 & 20.6589 \\ 20.6589 & 20.6589 & 20.6589 & 20.6511 & 20.0763 & \mathbf{6.9048} & \mathbf{6.3411} & \mathbf{6.3411} & \mathbf{6.3411} \\ \mathbf{6.3411} & \mathbf{6.2368} & \mathbf{5.8416} & \mathbf{5.2758} \end{array}$$

$$\delta : 0.0138 \ 0.1039 \ 0.1039 \ 0.1039 \ 0.1039 \ 0.1224 \ 0.1983 \ 0.2917$$
$$\delta_{3(cp)} = 0,1302$$

В этом случае все ИЭ защищены в полной мере – СЗ после атаки изменились незначительно, более того, Stego\_Graph1 обеспечит защиту и при увеличении значений атаки до  $\pm 7$  на каждый информационный элемент.

## Выходы

Таким образом, получил дальнейшее развитие общий подход к анализу состояния и технологии функционирования информационных систем, что дало возможность провести анализ некоторых СА в рамках построенной графовой модели СК, а также повысить устойчивость СА путем их модификации. Так устойчивость новой модификации базового стегоалгоритма Stego\_Graph повышена на 15% за счет анализа и выбора блоков для погружения СИ, что является доказательством адекватности построенной модели СК. Предложено методику сравнения параметров, а именно СЗ, матриц контейнера и СК, созданных различными СА, которая позволила получить априорную оценку устойчивости СА и выбрать из множества алгоритмов наиболее устойчивый.

**Список использованных источников:** 1. Ленков С.В. Методы и средства защиты информации: в 2 т. / С.В.Ленков, Д.А.Перегудов, В.А.Хорошко. – К.: Арий, 2008. – 464 . – Т.2: Информационная безопасность. – 2008. – 344 с. 2. Харари Ф. Теория графов / Ф.Харари; пер.с англ. В.П.Козырева. – М.: Мир, 1973. – 300 с. 3. Кобозева А.А. Анализ информационной безопасности / А.А.Кобозева, В.А.Хорошко. – К.: Изд. ГУИКТ, 2009. – 251 с. 4. Кобозева А.А. Загальний підхід до оцінки властивостей стеганографічного алгоритму, заснований на теорії збурень / А.А. Кобозева// Інформаційні технології і комп’ютерна інженерія. – 2008. – №1(11). – С.164-171. 5. Gkizeli M. Optimal Signature Design for Spread-Spectrum Steganography / M.Gkizeli, D.A.Pados, M.J.Medley // IEEE Trans. On Image Processing. – 2007. – Vol.16, № 2. – Р. 1021-1031. 6. Борисенко И.И. Особенности применения многогуровневого порогового преобразования изображения в компьютерной стеганографии / И.И. Борисенко // Праці УНДІРТ. – 2006. – №4(48). – С. 53 – 59. 7. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц / Ф.Р. Гантмахер. – М.:Наука, 1988. – 552с. 8. Борисенко И.И. Повышение помехоустойчивости стеганографического алгоритма / И.И.Борисенко// Сучасний захист інформації. – 2010. – №1. – С. 36-42.

**Bibliography (transliterated):** 1. Lenkov S.V. Metody i sredstva zashchity informacii: v 2 t. / S.V.Lenkov, D.A.Peregudov, V.A. Horoshko. – K.: Arij, 2008. – 464 . – T.2: Informacionnaja bezopasnost'. – 2008. – 344 s. 2. Harari F. Teoriya grafov / F.Harari; per.s angl. V.P.Kozyreva. – M.: Mir, 1973. – 300 s. 3. Kobozeva A.A. Analiz informacionnoj bezopasnosti / A.A.Kobozeva, V.A. Horoshko. – K.: Izd. GUIKT, 2009. – 251 s. 4. Kobozeva A.A. Zagal'niy pidhid do ocinki vlastivostej steganografichnogo algoritmu, zasnovaniy na teorii zburen' / A.A. Kobozeva // Informacionnye tehnologii i komp'juternaya inzheneriya. – 2008. – №1(11). – S.164-171. 5. Gkizeli M. Optimal Signature Design for Spread-Spectrum Steganography / M.Gkizeli, D.A.Pados, M.J.Medley // IEEE Trans. On Image Processing. – 2007. – Vol.16, № 2. – R. 1021-1031. 6. Borisenko I.I. Osobennosti primeneniya mnogourovnevogo porogovogo preobrazovaniya izobrazhenija v kompjuternoj steganografii/ I.I. Borisenko // Praci UNDIRT. – 2006. – №4(48). – S. 53-59. 7. Gantmaher F.R. Teoriya matric / F.R. Gantmaher. – M.:Nauka, 1988. – 552 s. 8. Borisenko I.I. Povyshenie pomehoustojchivosti steganograficheskogo algoritma / I.I.Borisenko // Suchasnij zahist informacii. – 2010. – №1. – S. 36-42.

УДК 621

Ю.Г. Гуцаленко, Харків, Україна

## ЗАМЕТКИ ПО ИСТОРИИ, СИСТЕМАТИКЕ И МОДЕЛИРОВАНИЮ ПРОРЕЗНЫХ ПРУЖИН

Стаття присвячена феномену прорізних пружин як відгуку на виклики розвитку техніки останніх поколінь. Розглядаються успіхи і проблеми розробки моделей прорізних пружин та питання їх систематики і вдосконалення. Виконаний огляд свідчить про техніко-технологічну необхідність, сучасну актуальність і перспективність подальших конструкторських і розрахункових розробок прорізних пружин.

Статья посвящена феномену прорезной пружины как отклику на вызовы развития техники последних поколений. Рассматриваются успехи и проблемы разработки моделей прорезных пружин и вопросы их систематики и совершенствования. Выполненный обзор свидетельствует о технико-технологической необходимости, современной актуальности и перспективности дальнейших конструкторских и расчетных разработок прорезных пружин.

*The article is devoted to the phenomenon of a slotted spring as a response to the challenges of the development of technology of the latest generations. The successes and problems of the development of models of slotted springs and the questions of their systematic and improvement are considered. The performed review shows the technical and technological need, the current relevance and the prospects for further design and development of slotted springs.*

### 1. Феномен прорезной пружины как отклик на вызовы развития техники

В 1938 году Сергей Дмитриевич Пономарев, 30-летний выпускник российского МВТУ (ныне МГТУ) им. Н. Э. Баумана и доцент кафедры сопротивления материалов в нем, публикует первую в мировой истории [1] монографию по расчету витых пружин [2] и становится национальным лидером в этом (пружины) направлении развития науки и техники. Значительно позднее, в 60-е и 70-е годы уже послевоенного периода, что, по-видимому, объясняется закрытостью тематики выполняемых работ и их подчиненностью запросам оборонной промышленности, из возглавляемой с 1948 г. С. Д. Пономаревым научной школы прикладной механики МВТУ им. Н. Э. Баумана, ведущего в подготовке специалистов для учреждений и предприятий советского военно-промышленного комплекса, в особенности авиационно-космических, трудами Сергея Дмитриевича, его коллег и учеников, вовлеченных в практические задачи создания новой техники новых возможностей, выходят основные известные из литературных источников аналитические разработки прогностически-проектных расчетов прорезной пружины [3-7], использующие опыт общей теории и реальной практики

кольцевых пружин витой и других конструкций, в особенности волнистых шайб (рис. 1, а) и тарельчатых (рис. 1, б-в).

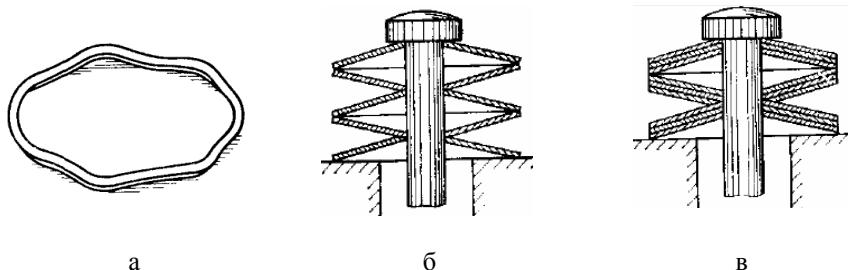


Рисунок 1 – Общий вид кольцевой волнистой пружинной шайбы (а) [8] и эскизные разрезы общего вида комплектов тарельчатых пружин (б, в) в последовательной (б) и пакетно-последовательной установке (в) [7]

Аналитика прорезных пружин использует подходы к расчету витых, поскольку по конструктивной сути оба вида имеют многокольцевую структуру. В отличие от не имеющей четкой (барьерной) кольцевой дискретизации непрерывной внутри пружины спирали витой пружины, кольца прорезной в устоявшемся ее представлении [7, 8] разделены равноширокими прорезями и по границам последних в горизонтальном сечении соединены барьерами-перемычками (рис. 2, а).

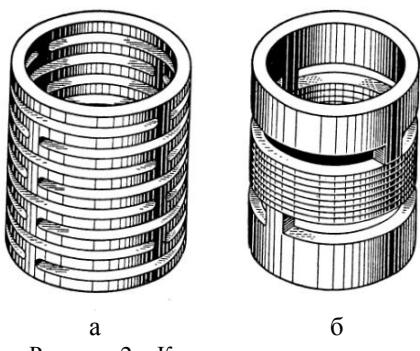


Рисунок 2 – Кольцевые пружины со связанными (прорезная пружина, а) и со свободными (б) кольцами [3]

Прорезные пружины относятся к классу жестких пружин [9, 10, 6]. Их применяют в тех случаях, когда радиальные габариты должны быть малыми, а несущая способность – большой [6]. Изготавливают прорезные пружины из цилиндрических труб фрезерованием сквозных пазов-прорезей. Они представляют собой единое тело из плоских колец, некоторым определенным образом соединенных перемычками. Все кольца, составляющие такие пружины, деформируются одинаково, причем каждое из них

закручивается и изгибаются. Наиболее опасными являются сечения у перемычек и равноудаленные от них. Прорезные пружины закрепляют,

например, с помощью резьбовых соединений на торцах и они могут служить в равной степени как пружинами сжатия, так и пружинами растяжения. В отличие от винтовых пружин растяжения - сжатия прорезные пружины при осевом нагружении перемещаются строго поступательно, что предопределяет повышенную прогнозируемость их поведения и, в сочетании с относительно высокими компактностью и несущей способностью, перспективы использования в составе различных устройств, в особенности повышенной точности.

По источнику из научной школы прикладной механики МВТУ им. Н. Э. Баумана [5], прорезная пружина явилась детищем технических вызовов периода второй мировой войны. Первые прямые публикации по проблематике прорезных пружин в открытых источниках информации обнаружаются в 60-х годах.

Наиболее ранней из публикаций в открытой печати, связанных с разработками конструкций, использующих прорезную пружину, по-видимому следует считать работу тоже выпускника МГТУ им. Н. Э. Баумана (1940 г.) И. А. Биргера, специалиста-прочниста ЦИАМ им. П. И. Баранова и по совместительству профессора МФТИ [11] (1961 г.), в период студенчества выполнявшего научную работу на кафедре сопротивления материалов [12], где в это время блистал расчетами пружин доцент С. Д. Пономарев.

На базы данных из этой работы [11], относящихся к определению автора к кольцевым пружинам, С. Д. Пономарев в 8-й главе своего итогового труда [7], посвященной кольцевым волнистым шайбам, ссылается как на основные. Очевидным объяснением применимости [11] и к кольцевым волнистым пружинным одновитковым конструкциям (шайбам), и к прорезным пружинам является подобие расчетных схем. Расчетной схемой кольцевой волнистой

шайбы [7] (рис. 3) является плоское кольцо, нагруженное в местах контакта с опорными поверхностями (здесь заметим: в случае прорезной пружины – по перемычкам) силами нормально плоскости кольца; аналитические решения для изгибающих и крутящих моментов определяются после раскрытия статической неопределенности.

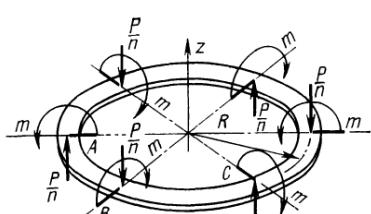


Рисунок 3 – Расчетная схема кольцевой волнистой шайбы [7]

В этой же 8-й главе [7] прямо указывается (цитируем): «Расчет кольца в рассматриваемых условиях нагружения приводится при расчете прорезных пружин (см. гл. 10)». По сути это признание превосходства ученика (И. А. Биргера) в части данных расчетов, а также в расчетах прорезных пружин. Поэтому не столь уж неожиданным выглядит

представляющееся все же системологически весьма спорным утверждение самого И. А. Биргера [6, 8] о том, что кольцевые волнистые пружины являются разновидностью прорезных пружин. Почему спорным? Ну нет же перемычек в кольцевых волнистых пружинах, а это неотъемлемый атрибут прорезной пружины! Да и другие допущения весьма серьезны, имея в виду во-первых, единственность кольца волнистой пружины (если не рассматривать пакетную сборку), во-вторых – его исходную (заданную) неплоскость.

Помимо сказанного выше, дополнительным и также существенным аргументом приоритетности работы [11] в обеспечении расчетов прорезных пружин является объяснение отсутствия ожидаемого прямого терминологического указания на это в предпосланном [11] заголовке.

Показательно, что в вышедшем в 1959 году первом издании возглавляемого И. А. Биргером справочного пособия по расчетам на прочность деталей машин [13], впоследствии выдержавшем три переиздания под его же руководством, не содержится никакой информации о прорезных пружинах. Как не упоминаются они и в выпущенной годом раньше (в 1958 г.), специально посвященной конструированию пружин монографии [14] Ростислава Стефановича Курендаша, впоследствии (1966 г.) основателя кафедры приборов точной механики Львовской политехники [15]. Работу над вторым изданием [3] справочного пособия по расчетам на прочность деталей машин (1966 г.) И. А. Биргер завершает в должности заместителя начальника и руководителя работ ЦИАМ им. П. И. Баранова по созданию двигателей ракеты-носителя «Протон» [12], естественно обладая расширенными профессионально-информационными возможностями. Объем справочника вырастает на треть. В нем прорезные пружины рассматриваются, но не самостоятельно, а как разновидность кольцевых, отличающаяся связанностью колец [3], рисунок 2. Отмечается подверженность прорезных пружин изгибу и кручению и, по аналогии с расчетом кольцевых пружин с двумя опорами, по [11] приводятся формулы для расчета величин возникающих при этом максимальных приведенных напряжений, усилий, перемещений, а также жесткости.

К аналогичным задачам конструкторских расчетов опертых колец, нагруженных перпендикулярно своей плоскости, позднее обращаются и другие исследователи, например [16, 4, 17].

С позиций определения места прорезных конструкций в общей систематике пружин интересен подход, изложенный между переизданиями [3] и [6] фундаментальным справочным изданием [18], подготовленным другим составом авторов под общей редакцией выпускника КПИ Владимира Николаевича Челомея – профессора того же МВТУ им. Н. Э. Баумана (с 1952 г.), директора и пожизненного генерального конструктора

выделившегося из структуры того же ЦИАМ им. П. И. Баранова ОКБ 52 (НПО машиностроения), объект специализации которого составили крылатые ракеты (с 1944 г.). 11-ю главу этого издания, среди других упругих элементов вибрационных машин включающую рассмотрение пружин, подготовили Михаил Владимирович Хвингия, заведующий отделом теории машин НИИ механики машин и полимерных материалов АН Грузии, и Эгон Эдгарович Лавендел, заведующий кафедрой теоретической механики и сопротивления материалов Рижского политехнического института. Прорезные пружины

лаконично описаны ими в полустраничных разделах «Прорезные пружины с винтовым пазом» (рис. 4, а) – по сути это та же конструкция обычной витой пружины с обычными для витых пружин сжатия специально обработанными перпендикулярно оси пружины опорными витками по ее торцам, сохранившаяся в современном инструментарии конструктора [19], но с возможностью варьирования не только площадью (диаметром) витков, но и пропорцией сторон их прямоугольного сечения, и «Кольцевые пружины» (рис. 4, б).

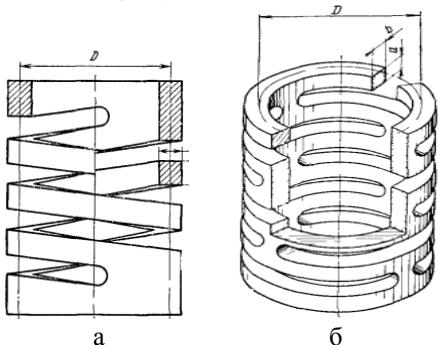


Рисунок 4 – Прорезные пружины:  
с винтовым пазом (а)  
и плоско-прорезная (б) [18]

Раздел «Кольцевые пружины» по сути описывает прорезную пружину характерной конструкции, но в терминологической постановке («цилиндрические плоско-кольцевые пружины») еще перекликается с определением [3] прорезной пружины как кольцевой со связанными кольцами.

Дальнейшую системологическую эволюцию представлений о прорезной пружине характерно отображают последующие переиздания того же справочного пособия по расчетам на прочность деталей машин. В третьем [6] (1979 г.) и четвертом [8] (1993 г.) изданиях рассмотрению прорезной пружине выделяется чуть больше страницы, но уже в обособленном видовом статусе, с расчетом в общем виде для произвольного числа  $n$  прорезей или перемычек на торце кольца и примером расчета для  $n=2$ .

Настольной у современных расчетчиков [20, 21] наряду с [8] является опубликованная С. Д. Пономаревым в завершающем его профессиональную деятельность и весь жизненный путь 1980-м году в соавторстве

с Л. Е. Андреевой книга [7], в которой прорезной пружине посвящена отдельная (10-я) глава.

Следуя современному научно-техническому спросу, прорезная пружина включена и рассмотрена изданием [20] среди избранных перспективных конструкций использования САПР SolidWorks (в SolidWorks Simulation) применительно к расчетам прочности и устойчивости.

## 2. Аналитическое и имитационное моделирование прорезной пружины

Как отмечалось выше, аналитические решения функциональных характеристик прорезной пружины известны из теории сопротивления материалов в разработках советских ученых. Украинские исследователи из Винницкого национального технического университета [21], на основании анализа литературных источников и современной расчетной практики с экспериментальной апробацией, рассматривая методики современного аналитического расчета прорезных пружин, представленные авторскими коллективами из МФТИ-ЦИАМ им. П. И. Баранова [8] и из МГТУ им. Н. Э. Баумана [7], отдают предпочтение второй – по мотивам большей простоты при достаточной точности. В другом исследовании [20], отличающемся большей гибкостью и свободой использования специализированного программного обеспечения реализации конечно-элементного подхода, наоборот, предпочтение в сопоставительном обращении к аналитическим расчетам отдается [8].

Компьютерное имитационное моделирование прорезных пружин и их поведения под нагрузкой как конечно-элементных объектов использует различное современное программное обеспечение. Например, в практике [21] – программный пакет Компас-3D V13 (подпрограмма APM FEM: прочностной анализ).

Выше уже отмечалось также, что в современной практике конструирования и исследования поведения под нагрузкой прорезных пружин применяется САПР SolidWorks совместно с интегрированными расчетными модулями семейства Simulation (ранее – CosmosWorks) [20].

Как покажем дальше, с использованием виртуальной информации по результатам моделирования [20], подобные исследования вооружают разработчика априорно неочевидной важной информацией для обоснованного принятия рациональных конструкторско-технологических решений.

Постановка и решение типовой задачи имитационного моделирования для прорезной пружины с сопоставлением его расчетных результатов с аналитическими решениями теории сопротивления материалов [8] выполнены [20] для цилиндрического объекта из изотропного материала

(конструкционная сталь) с радиальным расположением границ прорезей в ее теле (табл. 1).

Таблица 1 – Общий вид и геометрия прорезной пружины (пример [20])

Общий вид	Наименование (обозначение)	Значение	Вид пружины в сечении по перемычкам (A-A)
	Внутренний диаметр	82 мм	
	Наружный диаметр	106 мм	
	Толщина кольца	13 мм	
	Ширина прорези	2 мм	
	Центральный угол	160 °	
	Число колец	11	

Численные расчеты осадки прорезной пружины как разницы перемещений противоположных торцов по ее имитационной модели под нагрузкой (рис. 5) проведены [20] для двух вариантов задания граничных условий. В обоих исключено движение модели объекта как жесткого целого вдоль оси с пренебрежением податливостью торцевых опор, вторым (вариант Б, табл. 2) идеально жесткими дополнительно опорам модели объекта рассматриваются также его перемычки.

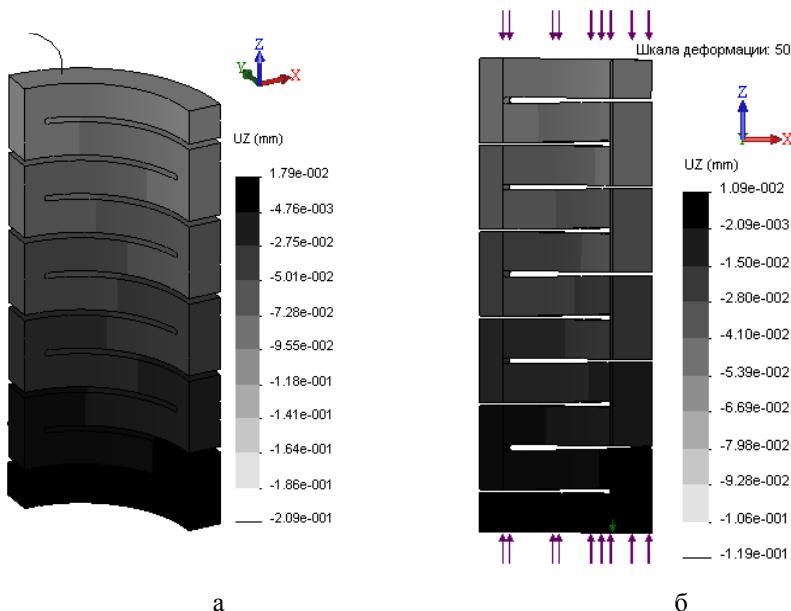


Рисунок 5 – Диаграммы осевого перемещения имитационных моделей [20]

Таблица 2 – Осевая осадка пружины по таблице 1 под нагрузкой 1 кН, мм

Расчеты по конечно-элементной модели в SolidWorks Simulation [20]		Расчет по теории сопротивления материалов [8]
Вариант А (рисунок 5, а)	Вариант Б (рисунок 5, б)	
0,191	0,108	0,071

В дополнение к показанному табл. 2 сравнению результатов для осевой осадки пружины по табл. 1 отметим, что оценки для напряжений, полученные из аналитических выражений [8] и конечно-элементным имитационным моделированием [20], отличаются большей сходимостью, с относительной погрешностью средних имитационных ожиданий от 2,3 % (кручение) до 4,0 % (изгиб): максимальные нормальные напряжения, порожденные изгибом кольца, составляют  $2,5 \times 10^7$  Па и примерно  $(2,3 \dots 2,5) \times 10^7$  Па, а максимальные касательные напряжения, вызванные кручением,  $8,6 \times 10^6$  Па и примерно  $8,8 \times 10^6$  Па соответственно.

Практически важнейшим с точки зрения эффективности использования и аналитических подходов, и подсистемы Simulation в САПР SolidWorks, в том числе в разработках конструкции, является повышение адекватности расчетных зависимостей и реалистичности имитации, а также следующих из них оценок. Поэтому вместе с автором [20] и на наш взгляд полезными дополнительными ремарками поясним следующее из табл. 2 существенное расхождение результатов, полученных аналитическим и имитационным моделированием.

Если исключить фактор качества конечно-элементной дискретизации, тем более, что в работе [20] конвенциальному обращению к алгоритму с использованием диаграмм Делано-Вороного предпочтен более гибкий, применительно к телам с криволинейными границами использующий элементы второго порядка, то расхождения в расчетах (табл. 2) следуют из расхождений исходных посылок аналитической модели и граничных условий имитационного моделирования.

Во всех известных из теории сопротивления материалов аналитических рассмотрениях и следующих им прикладных практических расчетов, и на это обращает внимание и автор [20], используются предположения об абсолютной жесткости перемычек и о функционировании деформируемых колец как плоских тонких балок, испытывающих исключительно изгиб и кручение.

Оба допущения, особенно второе, исключающее из рассмотрения поперечный сдвиг и растяжение-сжатие в кольцах, тем самым уменьшают расчетную податливость рассматриваемой системы колец с перемычками между ними относительно реальности и, соответственно, осевую осадку объекта в целом.

Здесь следует заметить, что еще в представленной в 1975 году к печати С. Д. Пономаревым и выполненной в возглавляемой им научной школе прикладной механики работе [4], а также в уточненном и расширенном варианте ее представления [5], расчетно-аналитически определена величина сдвиговой составляющей в общей осадке прорезной пружины, численно более влиятельной в конструкциях большей кривизны, а в рекомендациях [6], где предложен расчет прорезной пружины при числе прорезей (кольец)  $n=2$ , прямо указывается на допустимость пренебрежения деформацией сдвига в расчете осадки прорезных пружин лишь при малом числе перемычек между соседними кольцами.

### **3. Совершенствование имитационных моделей прорезной пружины**

Как следует из таблицы 2, пренебрежение податливостью перемычек (вариант Б по сравнению с вариантом А) повысило жесткость пружины почти в два раза, что радикально приблизило численную оценку к аналитической.

С этих позиций показательно исследование поведения конечно-элементной модели все той же прорезной пружины (табл. 1), находящейся под той же осевой нагрузкой 1 кН, но с дополнением граничных условий искусственным для изначально избранной [20] материалом исследуемой пружины конструкционной стали сдерживанием поперечно-сдвиговых процессов в ней. Для этого реальный модуль сдвига был увеличен в 1000 раз. Для предотвращения конфликта с программным обеспечением расчетов в SolidWorks Simulation в связи с автоматическим воспроизведением в нем расчетного модуля сдвига для изотропных материалов как зависимого параметра, функционально определяемого двумя другими постоянными – модулем Юнга и коэффициентом Пуассона, рассматриваемый изотропный материал интерпретирован в формально анизотропный (ортогонально-ортотропный), а фактически квазианизотропный, так как интерпретация заключалась в задании различных по осям координат значений искусственного модуля сдвига, но с минимальными отклонениями от избранногонского номинала ( $(2,1 \pm 0,1) \times 10^{11}$  Н/м<sup>2</sup>), допустимыми системой SolidWorks Simulation для восприятия всех трех значений параметра как различных. Следует отметить, что заданный как формально анизотропный материал при этом рассматривается системой SolidWorks Simulation как изотропный, так как критерием в этом рассмотрении является ортогонально-ортотропное постоянство модуля Юнга.

При выполненном таким образом [20] тысячекратном завышении реального модуля сдвига, имитирующем абсолютную жесткость материала объекта исследования, результирующая расчетная осевая осадка рассматриваемой конечно-элементным моделированием прорезной пружины составила 0,035 мм. Двукратное отставание от аналитического результата

(0,071 мм, таблица 2), отнесем к одновременному с искусственно вызванным уменьшением деформации от изгиба уменьшению и вклада в общую деформацию кручения колец, солидаризуясь с автором [20], и поясним это пропорциональным изменению жесткости  $B$  поперечного сечения кольца при изгибе изменением его жесткости  $C$  при кручении, которая согласно представленному [8] аналитическому решению вносит существенный вклад в общую податливость объекта. Так, в рассматриваемом аналитическом решении, согласно используемой [8] поддержке расчетов реляционными базами данных, для идеализированной бесконечно тонкими перемычками прорезной пружины в случае соотношения сторон прямоугольного сечения ее витков  $\approx 1$ , как это следует из таблицы 1,  $C = 0,65B$ .

Современная конструкторско-технологическая идеологическая платформа конечно-элементного моделирования в постановке и исследовании в современных САПР, одним из передовых представителей которых является SolidWorks, предоставляет практически неограниченной гибкости возможности отработки влияния и учета объемной геометрической моделью прорезной пружины, комплексом граничных условий ее нагружения и функциональности тончайших нюансов для повышения реалистичности результатов компьютерного анализа по отношению к эксплуатационной практике.

К таким, дополняющим круг внимания весьма методически обстоятельного и вне всякого сомнения современно актуального во всех звеньях триады учебно-научно-производственных практик исследования [20], можно отнести, например, вопросы геометрии концентраторов напряжений в переходных поверхностях между прорезью и перемычкой, а также распределенного характера передачи перемычке осевой нагрузки прорезной пружины.

Отметим, что на необходимость отдельного внимания к концентрации напряжений в зоне перемычек с приблизительным учетом этого фактора в аналитических расчетах обращал И. А. Биргер в своей первой системной справочной манифестации по прорезной пружине [3]. Современные конечно-элементные исследования применительно к моделированию конкретных специализированных применений прорезных пружин также указывают на важность использования решений с улучшенной геометрией мест концентрации напряжений. В работе [22] показано, что только благодаря оптимизации радиуса скругления в местах резкой смены конфигурации прорезной пружины можно добиться значительного (в несколько раз) снижения статических напряжений и еще более значительного повышения ее циклической прочности.

Показателен в кругу разбора подобных вопросов второго плана выполненный [20] анализ влияния на эксплуатационные характеристики

формы перемычки в поперечном сечении. Теоретическим выкладкам по научным канонам сопротивления материалов постановочно естественна радиусная (секторная) ориентация стенок перемычек внутри прорезей, как это следует, например, из расчетной схемы прорезной пружины [8] и принято в выполненном [20] сравнительном анализе расчетов по конечно-элементной

имитационной модели и по теории (см. вид пружины в сечении, приведенный в табл. 1). В реальных же твердотельных воспроизведениях прорезной пружины, как это видно, например, из иллюстративного материала [21] (рис. 6), следует ожидать более технологичную конструкцию с точки зрения прорезания паза в оболочке заготовки кольцевого кругового сечения, а именно с сегментной ориентацией стенок перемычек внутри прорезей (по хорде).

Рисунок 6 – Поршень с прорезной пружиной после поломки опорного кольца (фрагмент справа) [21]

Из методических соображений анализ влияния на эксплуатационные характеристики формы перемычки в поперечном сечении (вырезы в форме секторов и вырезы в форме сегментов) выполнен [20] для конструкций с относительно небольшими прорезями и для примерно равных площадей перемычек (рис. 7).

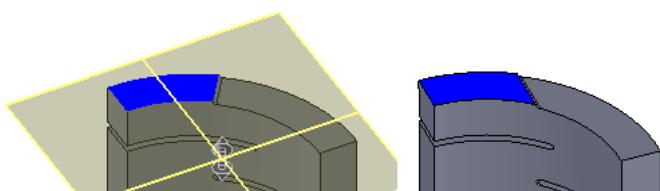


Рисунок 7 – Пружины с радиальными (слева) и сегментными (справа) вырезами: в разрезе (верх) горизонтальной плоскостью выделены участки перемычек [01]

Из представленных [20] диаграмм, результирующих конечно-элементное моделирование пружин по рис. 7 (индифферентные геометрии перемычек в горизонтальной плоскости параметры из таблицы 1) следует, что при идентичной нагрузке значительно разнится и осевая усадка (0,017 мм и 0,013 мм), и максимальные напряжения ( $2,64 \times 10^6$  Н/м<sup>2</sup> и  $5,70 \times 10^6$  Н/м<sup>2</sup>), причем меньшая осадка (следовательно, большая жесткость) и максимальные напряжения характеризуют пружину с сегментными вырезами. Как следует

из приведенного здесь сопоставления и отмечается [20], в рассматриваемых конструктивно-технологических альтернативах приоритет технологических аспектов оборачивается существенным ухудшением характеристик, в частности снижением допустимой (с точки зрения отсутствия необратимых деформаций) нагрузки. Именно это, как следует из экспериментальных данных [21], в первом же пуске устройства привело к поломке по рис. 6 вследствие контакта недопустимо деформированного опорного кольца с охватывающей поверхностью расточки корпуса.

Таким образом, прогнозировать свойства прорезных пружин посредством конечно-элементного анализа предпочтительнее, поскольку неизбежная реальность понижения строгости аналитической расчетной схемы хотя бы из-за реально ненулевой толщины перемычек, а тем более в сочетании с реально сегментной конфигурацией вырезов, значительно снижает реалистичность расчетных ожиданий функционального состояния.

Следует отметить, что как конечно-элементное моделирование [20] (с наложением условия «симметрия»), так и расчетно-аналитические подходы, в том числе в основном упоминаемый здесь в отсылках [8], исходят из выделения и рассмотрения четверти исходного объекта в его объемном симметричном секторировании по вертикалям перемычек.

## Заключение

Представленные материалы отражают технико-технологическую актуальность, современную востребованность и перспективность дальнейших конструкторских и расчетных разработок прорезных пружин, в том числе применительно к инновационному совершенствованию техники и технологий механической обработки резанием.

Наибольший интерес к разработке и расчету инновационных конструкций прорезных пружин во всей их истории наблюдается в авиационно-космической отрасли и военно-промышленном сегменте реальной экономики, а также в соответственно ориентированной среде интеллектуальной поддержки высшей технической школой.

Приоритетным инструментом современных конструкторских и расчетных разработок и прогнозики эксплуатационного поведения прорезных пружин и использующей их техники является конечно-элементное моделирование в соответствующе базирующихся САПР, например SolidWorks (SolidWorks Simulation) и Компас-3D (APM FEM).

Представленный здесь обзор является первой частью статейной дилогии автора, посвященной истории и современным перспективам разработок прорезных пружин в машиностроительных применениях. Во второй части (Применения и перспективы прорезных пружин в машиностроении) будут рассмотрены прорезные пружины в конструкциях отраслевого

машиностроения и, отдельно, в станкоинструментальных применениях, а также соответственно ориентированные конструкторско-технологические перспективы.

Эту работу автор посвящает благодарной памяти Рафаэля Ашотовича Баласаняна, своего преподавателя по курсу деталей машин в Харьковском политехническом институте в 1974-1975 гг., глубочайшего профессионального эрудита, блестящего лектора и великолепного собеседника, неутомимого просветителя и побудителя машиностроительных инженерных знаний и новаций.

- Список использованных источников:**
1. Пономарев Сергей Дмитриевич [Официальный сайт кафедры РК5 МГТУ им. Н. Э. Баумана] – <http://rk5.bmstu.ru/index.php/kafedra/istoriya/109-istoriya/242-ponomarev-sergei-dmitrievich>.
  2. Пономарев, С. Д. Расчет и конструкция витых пружин / С. Д. Пономарев. – М. : ОНТИ, 1938. – 352 с.
  3. Биргер, И. А. Расчет на прочность деталей машин (справочное пособие) / И. А. Биргер, Б. Ф. Шорр, Р. М. Шнейдерович; под общ. ред. И. А. Биргера. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : Машиностроение, 1966. – 616 с.
  4. Князева, В. А. К расчету толстостенных прорезных пружин / В. А. Князева // Изв. высш. учеб. заведений. Машиностроение [Изд. МВТУ им. Н. Э. Баумана]. – 1975. – № 10. – С. 18-22.
  5. Князева, В. А. Исследование напряженного и деформированного состояния толстостенных прорезных пружин / В. А. Князева // Расчеты на прочность. – Вып. 18. – М. : Машиностроение, 1977. – С. 246-256.
  6. Биргер, И. А. Расчет на прочность деталей машин: справочник / И. А. Биргер, Б. Ф. Шорр, Г. Б. Иосилевич. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1979. – 702 с.
  7. Пономарев, С. Д. Расчет упругих элементов машин и приборов / С. Д. Пономарев, С. Л. Андреева. – М. : Машиностроение, 1980. – 326 с.
  8. Биргер, И. А. Расчет на прочность деталей машин. Справочник / И. А. Биргер, Б. Ф. Шорр, Г. Б. Иосилевич. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1993. – 640 с.
  9. Бидерман, В. Л. Детали машин. Расчет и конструирование: Справочник : Т. 2 / В. Л. Бидерман, В. В. Ермаков, В. В. Каминская [и др.]; под ред. Н. С. Ачкерана. – 3-е изд., перераб. – М. : Машиностроение, 1968. – 408 с.
  10. Готовцев, А. А. Справочник металлурга : Т.1. / А. А. Готовцев, С. П. Демидов, А. В. Карп [и др.]; под ред. С. А. Чернавского и В. Ф. Рецикова. – 3-е изд., перераб. – М. : Машиностроение, 1976. – 768 с.
  11. Биргер, И. А. Расчет колыцевых изгибных пружин / И. А. Биргер // Расчеты на прочность. – Вып. 7. – М. : Машгиз, 1961. – С. 110-121.
  12. Биргер Исаак Аронович [Сайт «Космический мемориал»] – <http://sm.evg.ru/mjumjantsev.ru/des3/birger.htm>.
  13. Биргер, И. А. Расчет на прочность деталей машин (справочное пособие для конструкторов) / И. А. Биргер, Б. Ф. Шорр, Р. М. Шнейдерович. – М. : Машгиз, 1959. – 459 с.
  14. Кулендаш, Р. С. Конструирование пружин / Р. С. Кулендаш. – Киев : Машгиз. Укр. отд-ние, 1958. – 108 с.
  15. Історія кафедри приладів точкої механіки [Офіційний сайт Львівської політехніки] – <http://lp.edu.ua/pfm/istoriya-kafedry>.
  16. Порттер, М. А. Расчет колец, нагруженных перпендикулярно своей плоскости / М. А. Порттер, А. Т. Медведенко // Вестник машиностроения. – 1971. – № 2. – С. 9-12. – В надзаг. : Листки для конструктора.
  17. Шнейдер, Г. З. Расчет величины перемещения прорезной пружины / Г. З. Шнейдер, А. С. Розенберг, А. З. Фурман [и др.] // Вестник машиностроения. – 1983. – № 5. – С. 41-42.
  18. Вибрации в технике : Справочник. В 6-ти т. / Ред. совет : В. Н. Челомей (пред.). – Т. 4 : Вибрационные процессы и машины / Г. Г. Азбелль, И. И. Блехман, И. И. Быховский [и др.]; под ред. Э. Э. Лавендела. – М. : Машиностроение, 1981. – 509 с.
  19. Петров, М. С. Пружины в узлах приводов : Метод. указания к курсов. проектированию для студентов всех машиностр. специальностей / М. С. Петров, В. А. Рябов, О. А. Чихачева. – М. : МГТУ «МАМИ», 2001. – 28 с.
  20. Алямовский, А. А. SolidWorks Simulation. Как решать практические задачи / А. А. Алямовский. – СПб.: БХВ-Петербург, 2012. – 448 с.
  21. Обертох, Р. Р. Особливості розрахунку та проектування силових ланок гідроімпульсних пристрій для вібраційного різання та поверхневого зміцнення, виконаних у вигляді комбінації поршня з прорізною пружиною та

золотника з прорізною пружиною / Р. Р. Обертиюх, А. В. Слабкий, О. В. Поліщук // Міжвуз. зб. "Наукові нотатки" [Луцьк]. – Вип. 42 (2013). – С. 193-201. **22.** Беляєва, А. Ю. Вплив конструктивних параметрів кольцевих пружин резцедержателей на їх усталостну прочість в умовах вибраціонного резання / А. Ю. Беляєва // Мир техники и технологий. – 2013. – № 5. – С. 36-40.

**Bibliography (transliterated):** **1.** "Ponomarev Sergej Dmitrievich". Oficial'nyj sajt kafedry RK5 MGTU im. N. E. Baumana. Web. 10 August 2017 <<http://rk5.bmstu.ru/index.php/kafedra/istoriya/109-istoriya/242-ponomarev-sergei-dmitrievich>>. **2.** Ponomarev, S. D. Raschet i konstrukciya vityh pruzhin / S. D. Ponomarev. Moscow: ONTI, 1938. 352 p. Print. **3.** Birger, I. A., B. F. Shorr, and R. M. Shnejderovich. Raschet na prochnost' detaej mashin. Ed. by I. A. Birger. Moscow: Mashinostroenie, 1966. 616 p. Print. **4.** Knyazeva, V. A. "K raschetu tolstostennih proreznyh pruzhin". Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Mashinostroenie. 1975, Iss. 10, 18-22. Print. **5.** Knyazeva, V. A. "Issledovanie napryazhennego i deformirovannogo sostoyaniya tolstostennih proreznyh pruzhin". Raschet na prochnost'. Moscow: Mashinostroenie, 1977. Iss. 18, 246-256. Print. **6.** Birger, I. A., B. F. Shorr, and G. B. Iosilevich. Raschet na prochnost' detaej mashin. Moscow: Mashinostroenie, 1979, 702 p. Print. **7.** Ponomarev, S. D., and S. L. Andreeva. Raschet uprugih ehlementov mashin i priborov. Moscow: Mashinostroenie, 1980, 326 p. Print. **8.** Birger, I. A., B. F. Shorr, and G. B. Iosilevich. Raschet na prochnost' detaej mashin. Moscow: Mashinostroenie, 1993, 640 p. Print. **9.** Biderman, V. L., et al. Detali mashin. Raschet i konstruirovaniye. Vol. 2. Ed. by N. S. Acherkan. Moscow: Mashinostroenie, 1968, 408 p. Print. **10.** Gotovcev, A. A., et al. Spravochnik metallista. Vol. 1. Ed. by S. A. Chernavskij and V. F. Reschikov. Moscow: Mashinostroenie, 1976, 768 p. Print. **11.** Birger, I. A. "Raschet kol'cevyh izgibnyh pruzhin". Raschet na prochnost'. Moscow: Mashgiz, 1961, Iss. 7, 110-121. Print. **12.** "Birger Isaak Aronovich". Sajt "Kosmicheskij memorial". Web. 10 August 2017 <<http://sm.evg.-rumjantsev.ru/des3/birger.htm>>. **13.** Birger, I. A., B. F. Shorr, and R. M. Shnejderovich. Raschet na prochnost' detaej mashin. Moscow: Mashgiz, 1959, 459 p. Print. **14.** Kurendash, R. S. Konstruirovaniye pruzhin. Kiev: Mashgiz, 1958. 108 p. Print. **15.** "Istorya kafedri priladiv tochnoi mekhaniki". Oficijniy sajt Lviv'skoi politekhniki. Web. 10 August 2017 <<http://lp.edu.ua/ptm/istoriya-kafedry>>. **16.** Porter, M. A., and A. T. Medvedenko. "Raschet kolec, nagruzhennyh perpendikulyarno svoej ploskosti". Vestnik mashinostroeniya. 1971, Iss. 2, 9-12. Print. **17.** Shnajder, G. Z., et al. "Raschet velichiny peremeshcheniya proreznoy pruzhiny". Vestnik mashinostroeniya. 1983, Iss. 5, 41-42. Print. **18.** Vibracii v tekhnike. 6 vols. Head of Ed. Council V. N. Chelomej. Vol. 4: Vibracionnye processy i mashiny. Ed. by E. E. Lavendel. Moscow: Mashinostroenie, 1981, 509 p. Print. **19.** Petrov, M. S., V. A. Ryabov, and O. A. Chihacheva. Pruzhiny v uzlah privodov. Moscow: MGTU «MAMI», 2001, 28 p. Print. **20.** Alyanovskij, A. A. SolidWorks Simulation. Kak reshat' prakticheskie zadachi. SPb.: BHV-Peterburg, 2012, 448 p. Print. **21.** Obertyuh, R. R., A. V. Slabkij, and O. V. Polishchuk. "Osoblivosti rozrahunku ta proektuvannya silovih lanok gidroimpul'snih pristroiv dlya vibracijnogo rizannya ta poverhnevogo zmicnennya, vikonanih u viglyadi kombinacii porshnya z proriznoyu pruzhinoyu ta zolotnika z proriznoyu pruzhinoyu". Naukovi notatki. – Iss. 42 (2013), 193-201. Print. **22.** Belyaeva, A. Yu. "Vliyanie konstruktivnyh parametrov kol'cevyh pruzhin rezcederzhatelej na ih ustalostnuyu prochnost' v usloviyah vibracionnogo rezaniya". Mir tekhniki i tekhnologij. 2013. Iss. 5, 36-40. Print.

УДК 621.923.12

С.Л. Евтифеев, канд. техн. наук, Д.О. Крушельницкий, Одесса, Украина

## РАЗРАБОТКА ИЗНОСОСТОЙКОГО СПЛАВА НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ Fe-Si-Cu-C

Цель работы – разработать новый сплав на основе системы элементов Fe-Si-Cu-C для увеличения ресурса кулачковых механизмов, работающих на трение, методом нанесения дополнительного покрытия, имеющее антифрикционные свойства, и стоимость которого будет не велика, поскольку состав сплава для покрытия не будет содержать в себе дефицитных и дорогих компонентов.

**Ключевые слова:** увеличения ресурса кулачковых механизмов, покрытия

Мета роботи – розробити новий сплав на основі системи елементів Fe-Si-Cu-C для збільшення ресурсу кулачкових механізмів, що працюють на тертя, методом нанесення додаткового покриття, яке має антифрикційні властивості, і вартість якого буде не велика, оскільки склад сплаву для покриття не буде містити в собі дефіцитних і дорогих компонентів.

**Ключові слова:** збільшення ресурсу кулачкових механізмів, покриття

The aim of work is to develop a new alloy based on a system of Fe-Si-Cu-C elements to increase the life of the cam mechanisms operating on friction by an additional coating method having antifriction properties and the cost of which will not be great, since the composition of the coating alloy will contain scarce and expensive components.

**Keywords:** increase in life of cam mechanisms, coating

Как известно, каждая деталь или составляющая любого оборудования имеет свой ресурс, по истечению которого деталь подлежит либо замене на новую, либо восстановлению, ресурс же детали зависит от многих факторов, главными из которых являются:

- соответствие материала, из которого изготовленная данная деталь условиям эксплуатации;
- условия эксплуатации детали должны соответствовать требованиям технической документации;
- её регламентное обслуживание и т.д.

Важнейшим фактором работоспособности детали является материал, из которого она изготовлена. В большинстве случаях применяются известные стали и сплавы, а условия эксплуатации подгоняются под свойства известных материалов. Поэтому разработка материалов и покрытий для конкретных условий работы является актуальной задачей, которая не имеет общего решения до настоящего времени.

В современных машинах, особенно в машинах-автоматах, широко используются механизмы, позволяющие в пределах рабочего цикла иметь Висту (остановку) выходного звена заданной длительности при непрерывном

движении выходного звена. Такие механизмы получили название механизмов прерывистого движения, или механизмов с Вистой (остановкой). Для этого используют различные механизмы: кулачковые, малтийские, храповые, с неполнозубыми колёсами, рычажные и комбинированные (зубчато-рычажные, кулачково-рычажные и др.) Наибольшее распространение получили кулачковые механизмы, а потому рассмотрим их в первую очередь.

Кулачковыми называют механизмы, в состав которых входит высшая кинематическая пара, одним из элементов которой является поверхность переменной кривизны. Звено, которому принадлежит элемент высшей кинематической пары, выполненный в виде поверхности переменной кривизны, называют кулачком.

Закон движения толкателя определяется профилем кулачка, который является своеобразной программой работы исполнительного органа механизма. Поскольку этот профиль может быть разным, то с помощью кулачковых механизмов можно обеспечить почти любой закон движения выходного звена. Эта основное достоинство кулачковых механизмов, которое объясняет широкое применение этих механизмов в технике, особенно в сложных машинах-автоматах, где надо обеспечить согласованное движение многих исполнительных органов.

Одновременно кулачковые механизмы имеют существенные недостатки, основным из которых является наличие у них высшей кинематической пары, в которой контакт между звеньями происходит в точке или по линии. Здесь возникает большое удельное давление, что приводит к быстрому износу соприкасающихся деталей, особо опасен износ кулачка, поскольку он обеспечивает закон движения выходного звена, например, в механизмах газораспределения двигателей внутреннего сгорания, а именно распределительный вал – рычаг привода клапана.

Нередко в таких случаях на распределителях видны так называемые следы побежалости, а они обычно являются спутниками масляного «голодания», вследствие чего происходит нагрев поверхности при трении и собственно сам износ, это и есть основная проблема.

Целью работы является разработка сплава, который бы обеспечивал высокую износостойкость и долговечность в сложных условиях работы кулачковых механизмов при трении качения с проскальзыванием.

Например, подшипниковые сплавы, которые обладают неоднородной структурой, улучшающею подвод масла к врачающемуся валу, имеют хорошую прочность на сжатие, износ, и при всём этом имеют достаточную твёрдость, но не применяются в кулачковых механизмах из-за низкого временного сопротивления растяжению и малой контактной прочности.

Частые примеры решения задачи выбора сплава для заданных условий работы:

- антифрикционные чугуны, марки СЧ20 или СЧ30, это сплавы, на основе железа, которые представляют собой перлитный чугун с мелкими графитовыми включениями.
- антифрикционные сплавы (баббиты), которые применяют для заливки вкладышей подшипников, как пример марка Б83 – сплав на основе олова, содержащий 83% олова, 11% сурьмы и 6% меди. Имеет данный сплав 3 фазы;  $\beta$  фаза – светлые гранёные первичные кристаллы (твердые включения),  $\alpha$  фаза – тёмные кристаллы раствора на базе олова (мягкие включения) и  $\gamma$  фаза ( $Cu_3Sn$ ) – звёздочка-образные белые кристаллы.

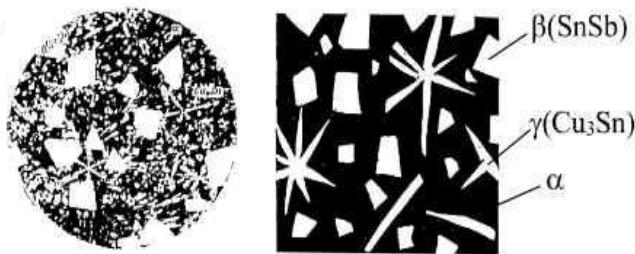


Рисунок 1 – Микроструктура баббита Б83, x200

Во всех этих примерах реализуется принцип Шарпи, суть которого заключается в том, что основное правило расположения в сплаве структурных фаз, обеспечивающих высокие антифрикционные и износостойкие свойства сплава, а также его прочность, вязкость и другие свойства. По принципу Шарпи – наиболее твердые структурные составляющие должны располагаться в виде изолированный друг от друга включений, а наиболее вязкие – образовывать сплошную матрицу. Сплав разработан для подшипников скольжения.

В процессе трения происходит износ мягких фаз, и образуются поры на поверхности, которые позволяют, получить эффект удерживания смазки на поверхности, что важно в процессе эксплуатации, особенно в моменты «пуска-остановки» когда давление масла для смазывания поверхностей трения недостаточно.

В настоящее время в качестве материала кулачков механизмов газораспределения используются чугуны марок ВЧ50, ВЧ60, КЧ50-4 или конструкционные среднеуглеродистые и низколегированные стали типа сталь 45, 40Х после закалки т.в.ч. или азотирования. Срок службы этих пар трения не превышает 150 – 160 тыс. км пробега [3, 4].

В работе применен кардинальный подход к изменению материалов пары трения кулачковых механизмов и изучены новые сплавы на базе системы элементов Fe-Si, доменный ферросилиций с легирующими добавками.

В настоящее время сплавы системы Fe-Si не исследованы для трения скольжения и качения, особенно если в этих сплавах повышенное содержание углерода (1% и более). Особый интерес представляет легирование этих сплавов Си и Mo [1].

В основном ферросилиций используют в качестве легирующей добавки при выплавке и модифицированию чугуна либо в электротехнике, так как он имеет низкое содержание углерода, увеличение которого обеспечивает повышение стойкости к трению и является дешевым аналогом FeMo и FeMn.

Медь – это пластичный, золотисто-розовый металл с характерным металлическим блеском, находящийся на втором месте по электропроводности (уступая серебру), довольно распространённый, и относительно не дорогой металл, часто использующийся как в электротехнике, так и в машиностроении (в качестве примеси). Известно, что присутствие меди в закрытых и полузакрытых системах трения может образовывать эффект избирательного переноса с образованием серовитых пленок, что снижает износ трущихся поверхностей и является полезным в тех местах, где реализуется механизм трения, качения и скольжения. Условия образования серовитой пленки является присутствие на поверхности трения поверхностно активных веществ. [4]

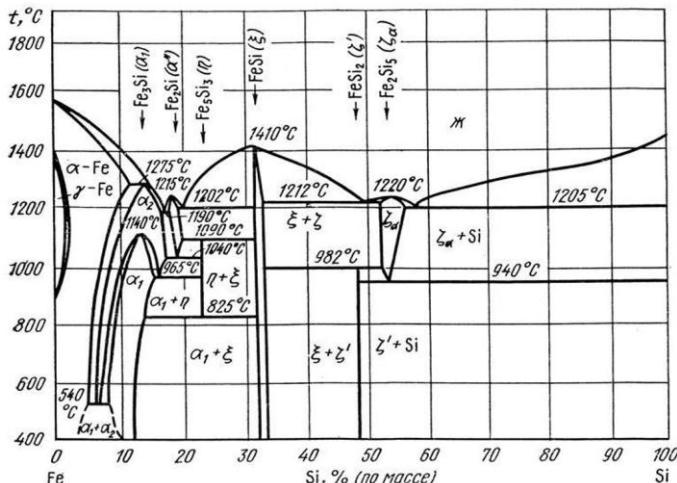


Рисунок 2 – Диаграмма состояния системы Fe-Si [2]

На рис. 2 приведена диаграмма состояния сплавов системы Fe-Si во всём объёме концентраций. Особенности этой диаграммы является то, что сплавы с содержанием Si до 7% используются в виде электротехнических сталей, а на трение такие сплавы вообще не испытывались. Интерес представляют сплавы с содержанием Si до 20 % где образуются группа твердых упорядоченных растворов  $\alpha + \alpha_1 + \zeta$  при наличии перитектических и перитектоидных реакций в области температур 1200 – 1275 °C.

По аналогии с эвтектическими сплавами, сплавы перитектического типа обладают хорошей жидкотекучестью, не высокой температурой плавления и легко наплавляются всеми способами наплавки.

Повышенное содержание углерода в доменных ферросилициях до 1,5 % формирует в структуре цементит, что увеличивает твердость и хрупкость сплавов. Поэтому представляет интерес введение в сплав пластичной меди, что может обеспечить снижение хрупкости сплавов, повышение теплопроводности покрытий после наплавки и высокие антифрикционные свойства.

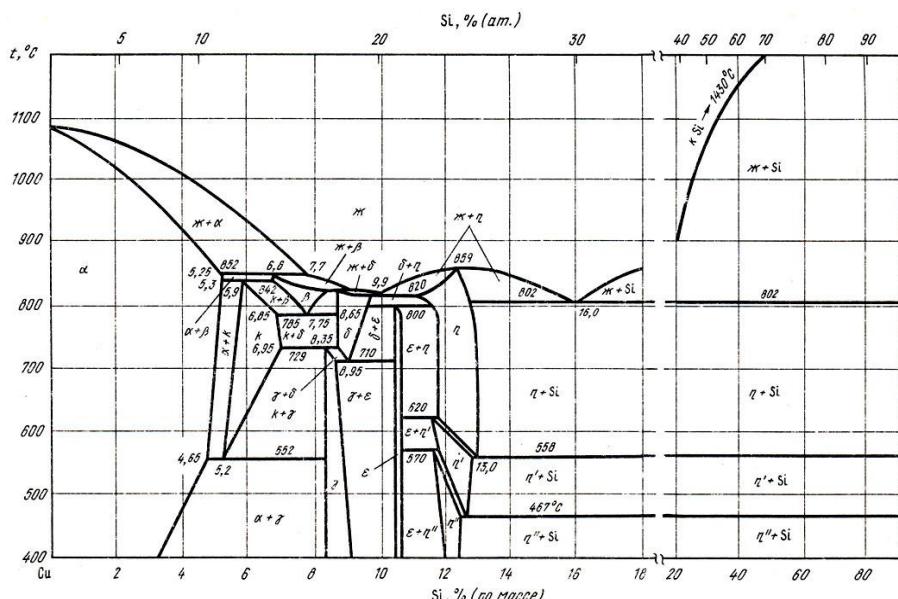


Рисунок 3 – Диаграмма состояния системы Si-Cu [2]

На рис. 3 приведена диаграмма состояния системы двойных сплавов Si-Cu. Известны кремнистые бронзы, обладающие высокой твердостью и износостойкостью. Однако, прочность и литейные свойства этих бронз уступают оловянистым. Также, у высококремнистых бронз антифрикционные свойства оставляют желать лучшего.

Принципиально рассматриваются сплавы при содержании меди до 25 %. Диаграмма состояния в данном случае содержит как эвтектические, так и перитектические реакции. Особенно это проявляется при содержании Cu 15 % с образованием эвтектики состава  $\eta + \text{Si}$ , что позволяет получить высокие литейные свойства для наплавки. В случае тройной системы Cu-Fe-Si возможно образование более сложных структурных составляющих и фаз, что благоприятно скажется на антифрикционности и износостойкости.

На рис. 4 изображена диаграмма двойной системы Fe-Cu. Сплавы этой диаграммы в промышленности не нашли применения.

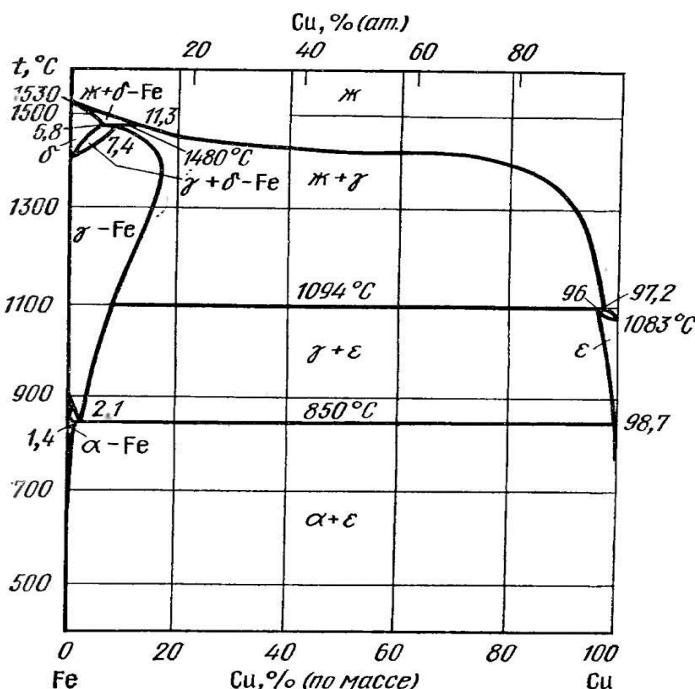


Рисунок 4 – Диаграмма состояния Fe-Cu [2]

При анализе двойных диаграмм рассматривались сплавы с содержанием Si до 20%, Cu до 25%, C до 1.5%. Вероятные фазы и структурные составляющие приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Вероятные фазы в системе Fe-Si-Cu-C

Содержание примеси	Фазы Fe-Si	Фазы Si-Cu	Фазы Fe-Cu
Si 9	$\alpha + \alpha_1 + \text{Fe}_3\text{C}$	$\alpha_1 + \gamma$	$\varepsilon + \alpha + \text{Fe}$
Si 10	$\alpha + \alpha_2 + \text{Fe}_3\text{C}$	$\alpha_1 + \alpha_2 + \gamma$	$\varepsilon + \alpha + \text{Fe}$
Si 11	$\alpha_1 + \varepsilon + \text{Fe}_3\text{C}$	$\alpha_1 + \alpha_2 + \gamma$	$\varepsilon + \alpha + \text{Fe}$
Si 12	$\alpha_1 + \varepsilon + \text{Fe}_3\text{C}$	$\alpha_1 + \alpha_2 + \eta$	$\varepsilon + \alpha + \gamma + \text{Fe}$
Si 13	$\alpha_1 + \varepsilon + \text{Fe}_3\text{C}$	$\alpha_1 + \alpha_2 + \eta$	$\varepsilon + \alpha + \gamma + \text{Fe}$

Как видно из табл. 1, имеет место от двух до трёх и более фаз в сплавах. Измерение твёрдости проводилось на микротвёрдомере ПМТ 3, при нагрузке в 20 и 50 грамм, результаты измерений занесены в табл. 2.

Таблица 2 – Микротвёрдость фаз сплава

Содержание кремния	Твёрдый раствор, состав $\alpha_1 + \alpha_2 + \gamma + \varepsilon$ , HV	Ледебуритно подобная структура ( $\varepsilon + \text{Fe}_3\text{C}$ ), HV	Фазы меди, $\alpha + \varepsilon + \gamma$ HV
Si до 10%	473	693	129
Si до 15%	318	657	172,2
Si до 20%	482	685	123,4

Для получения износостойкого сплава применяется ферросилиций, Cu15 и другие, приведённые в табл. 1, компоненты, указанные в табл. 3.

Для увеличения содержания углерода в ферросилиции FeSi25 добавляем чугун доэвтектический передельный, нагреваем до температуры 1200-1250 С, выплавляем в тигле из силицированного графита. Масса садки – до 0.5 кг, плавили на установке ТВЧ.

Таблица 3 – Химический состав FeSi15

Марка	Массовая доля, %							
	Si	Al Не более	P Не более	S Не более	C Не более	Mn Не более	Cr Не более	Ti Не более
FeSi10	8,0-13,0	0,2	0,15	0,06	2,0	3,0	0,8	0,30
FeSi15	14,0-20,0	1,0	0,15	0,06	1,50	1,50	0,8	0,30
FeSi25	20,0-30,0	1,5	0,15	0,06	1	1	0,8	0,30

Шихта для выплавки приведена в табл. 4.

Таблица 4 – Состав шихты для выплавки сплава

№	FeSi15, %	FeSi25, %	Чугун ПЧ-2	Cu- отходы	Флюс $B_2O_3+Na_2B4O_7$
1	84	-	-	16	10% от общей массы
2	-	25	60	15	
3	-	25	50	25	

Испытания проводились на машине трения СМЦ-2 по схеме «ролик-ролик», степень проскальзывания до 20 % включительно [3].

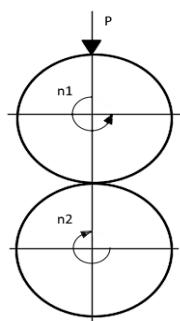


Рисунок 5 – Схема испытания на трение по системе «ролик-ролик»  
 $d = 50\text{мм}$ ;  $b_1 = 12\text{мм}$ ;  $b_2 = 10\text{мм}$ ;  $n_1 > n_2$

Наплавка проводилась на верхний ролик. Матеріал нижнього ролика – сталь 40Х, закалка + низкий отпуск, HRC 53-57.

Режим испытаний: общая нагрузка на пару трения 40 и 60 кгс, скорость вращения нижнего ролика 1000 об/мин, смазка граничная, подача в зону трения капельная на нижний ролик.

Контролировалось момент трения, диаметр роликов, масса до и после испытания. Контроль приработки проводился по установившемуся моменту трения.

Установлено, что сплавы с содержанием меди до 16% от массовой доли, в процессе приработки деформируются на величину 0,2 - 0,3 мм в сторону уменьшения диаметра, а в процессе испытаний изменение размера практически нет. По результатам испытания определили, что время приработки зависит от структуры сплава. Сплавы со структурно свободными медными фазами  $\alpha+\epsilon$ , и твёрдостью не более  $HV_{0.05} = 172-200$ , прирабатываются в 2 - 3 раза быстрее.

Наплавка проводился на рокер или кулачек, на установке ТВЧ модели 063/440, методом диффузионного силицирования сталей.

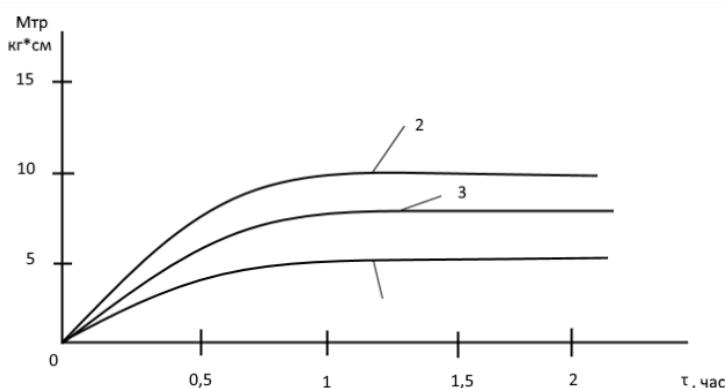


Рисунок 6 – График сравнения трёх сплавов с разным количеством в них Cu

- 1- Сплав с содержанием меди до 15% от массы;
- 2- Сплав с содержанием меди от 15 - 20% от массы;
- 3- Сплав, с содержанием меди от 20 - 25% меди от массы

Из рис. 6 видно, что сплав позиции 1, с содержанием меди до 15% от массовой доли наиболее хорошо себя показал в соотношении времени и износа, что наталкивает на мысль о том, что 15% содержания меди

в антифрикционном сплаве – является наиболее актуальным содержанием по сравнению с другими образцами позиции 2 и 3.

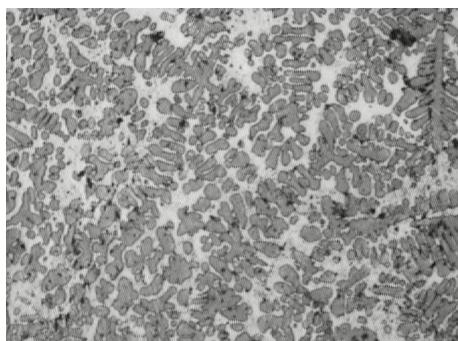


Рисунок 7 – Микроструктура сплава  
с содержанием Cu 25%,  
увеличение x240

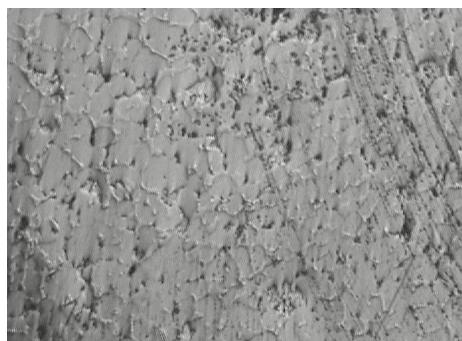


Рисунок 8 – Микроструктура  
сплава с содержанием Cu до 15%,  
увеличение x240

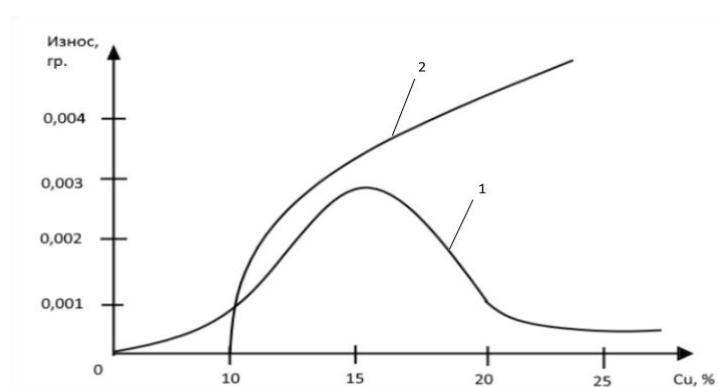


Рисунок 8 – График сравнения износа роликов  
1 – ролик с наплавкой; 2 – ролик сталь 40Х (3+ О<sub>h</sub>)

Износ определялся весовым способом на аналитических весах с точностью измерения до 0,0001 гр. верхнего и нижнего роликов.

База испытаний 1000 циклов, 1 цикл = 100 оборотов ролика.

По результатам исследования было установлено, что на износостойкость влияет не только химический состав сплава, но и наличие в этом самом сплаве структурно свободных фаз меди. При увеличении количества структурно свободных фаз меди износ пары трения резко уменьшается, примерно в 2 раза.

Вывод: впервые исследован износостойкий сплав системы Fe-Si, с добавками Си и С. Установлено, что эти сплавы имеют перспективу для применения при восстановлении и упрочнении деталей, работающих при трении качения с проскальзыванием. Впервые обнаружен эффект при проработке этих сплавов без износной деформации, что требует дальнейших исследований.

**Список используемых источников:** 1. Земсков Г.В., Витченко В.А. и др. Авторское свидетельство №864703. – 1980. – 7с. 2. Шанк Ф.А. Структуры двойных сплавов: Металлургия. – 1973. – 760с. 3. Хебды М. Трение изнашивание и смазка: Машиностроение, Варшава. – Т.1, 1989. – Т.2, 1990, – Т.3, 1992. 4. Кут'ков А.А. Износостойкие и антифрикционные покрытия: Машиностроение. – 1976. – 152с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Zemskov G.V., Vitchenko V.A. i dr. Avtorskoe svidetel'stvo №864703.– 1980. – 7s. 2. Shank F.A. Struktury dvojnyh splavov: Metallurgija. – 1973. – 760s. 3. Hebdy M. Trenie iznashivanie i smazka: Mashinostroenie, Varshava. – T.1, 1989. – T.2, 1990, – T.3, 1992. 4. Kut'kov A.A. Iznosostojkie i antifrikcionnye pokrytiya: Mashinostroenie – 1976. – 152s.

УДК 621.923.42

В.В. Кальченко, д-р техн. наук, В.І. Венжега, канд. техн. наук,  
О.О. Литвин, Д.В. Кальченко, Чернігів, Україна

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ДВОСТОРОННЬОГО ШЛІФУВАННЯ ТОРЦІВ ШТОВХАЧА З РІЗНИМИ ДІАМЕТРАМИ ЗІ СХРЕЩЕНИМИ ОСЯМИ КРУГІВ З ПЛОСКИМИ ТОРЦЯМИ ТА ДЕТАЛЕЙ

Запропоновано тривимірне геометричне моделювання інструментів, процесу зняття притиску та формоутворення при двосторонньому торцевому шліфуванні штовхачів, що не обертаються та обертаються під час шліфування. Обробка деталей виконується орієнтованими шліфувальними кругами. Після входу однієї деталі в зону обробки наступна повинна входити з обернено орієнтованими торцями для забезпечення урівноваження сил різання та високої точності обробленої поверхні. Наведено розрахунок сил різання при шліфуванні торців штовхачів.

**Ключові слова:** моделювання інструментів, двостороннє торцеве шліфування

Предложено трехмерное геометрическое моделирование инструментов, процесса снятия притиска и формообразования при двустороннем торцевом шлифовании толкателей, которые не врачаются и врачаются во время шлифования. Обработка деталей выполняется ориентированными шлифовальными кругами. После входа одной детали в зону обработки следующая должна входить с обратно ориентированными торцами для обеспечения уравновешивания сил резания и высокой точности обработанной поверхности. Приведен расчет сил резания при шлифовании торцов толкателей.

**Ключевые слова:** моделирование инструментов, двустороннее торцевое шлифование

The three-dimensional geometric modeling of tools, the process of pulling off and forming in the two-way end grinding of non-rotating and rotating pushers during grinding are proposed. The machining of parts is done by oriented grinding wheels. Following the entry of one part in the processing area, the next should come with inversely oriented ends to ensure the balance of the cutting forces and the high accuracy of the treated surface. The calculation of cutting forces when grinding the ends of pushers is given.

**Keywords:** modeling of tools, two-way end grinding

В сучасних умовах розвитку автомобілебудування та машинобудування, отримання високоточних деталей пов'язане з високими вимогами до точності деталей та їх продуктивності шліфування із широким застосуванням сучасних технологій механічної обробки. У значній мірі, це відноситься до обробки деталей з високими вимогами до точності торцевих поверхонь, таких як, штовхачі, клапани, та ін.

Одним із найефективніших способів шліфування торцевих поверхонь деталей є шліфування на двосторонньому торцешліфувальному верстаті. Якщо порівнювати обробку торцевих поверхонь на двосторонньому торцешліфувальному верстаті, та односторонньому торцешліфувальному

верстаті, то більш високоефективним є двосторонній торцевшлифувальний верстат.

Для кращої відповідності високим критеріям обробки деталей, є за потрібне, розробка взаємопов'язаної модульної 3D-моделі інструментів та формоутворення, що описує процес двостороннього шліфування торцевих поверхонь штовхачів, орієнтованими шліфувальними кругами. Проведено дослідження процесу шліфування торців штовхачів, способу кріплення штовхачів, виконано 3D-моделювання. Все це створює передумови для створення нових високоефективних технологій та способів шліфування торців деталей та їх подальшому впровадженню у виробничі процеси на промисловості. Зокрема, збільшення точності, якості і продуктивності обробки деталей, здійснюється через вдосконалення способів двостороннього шліфування торців штовхача з різними діаметрами зі схрещеними осями кругів з плоскими торцями та деталей.

При цьому, дуже важливо мати у розпорядженні математичні моделі основних параметрів процесу обробки деталі та інструменту, що дозволить більш обґрунтовано, з точки зору наукового підходу, створювати та ефективніше керувати процесом обробки деталей. В такому випадку добре представлене модульне 3D-моделювання двостороннього торцевого шліфування деталей з циліндричними торцевими поверхнями в роботах [1, 2].

Багато з провідних компаній світу, зокрема, *Saturn* (Німеччина) [3] виконують обробку деталей на двосторонніх торцевшлифувальних верстатах, шліфування відбувається з невеликим нахилом шліфувальних кругів в одній площині, що потребує декілька проходів, при обробці торців різного діаметру та потребі зняття великих припухів.

Розрахунки сил різання при двосторонньому шліфуванні торців деталей та обробці циліндричних деталей орієнтованими шліфувальними кругами представлено в роботах [4-11].

Можемо також відмітити, що в цих роботах не розглядається загальна модульна 3D-модель двостороннього торцевого шліфування штовхачів, що не обертаються та обертаються під час обробки. Не досліджено вплив способу фіксації штовхачів на барабані, їх порядок відносно чергування більшого та меншого діаметрів торців на геометричну точність формоутворення оброблюваних поверхонь.

Мета даної роботи полягає у створенні модульної 3D-моделі, процесів зняття припухку та формоутворенні торцевих поверхонь деталей, розрахунку сил різання, усунені дії сил, що призводять до імпульсів на барабані та торці деталей при обробці. Що дозволить більш якісно проаналізувати процеси зняття припухку та формоутворення, розробити нові та вдосконалити існуючі способи, а також на їх базі розробити високоефективні технології шліфування торцевих поверхонь штовхачів, клапанів та ін.

На рис. 1 зображено розрахункову схему шліфування торцевих поверхонь штовхачів на двосторонньому торцешліфувальному верстаті. Шліфувальний круги 1, 7, втулки 2, 4. Деталі 3, 5 подаються в зону обробки за допомогою барабана подачі виробів 6. Перед обробкою шліфувальний круг правлять.

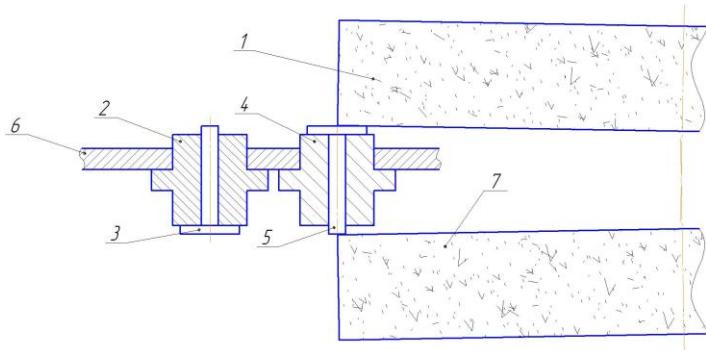


Рисунок 1 – Розрахункова схема формоутворення торців штовхачів

Формоутворення торцевої поверхні деталі при обробці шліфувальним кругом з плоскою торцевою поверхнею здійснюється максимальним діаметром, радіус-вектор якого описується рівнянням:

$$R_{\text{instr}}(\theta_p, \theta) := C(0, \theta, 0) \cdot S(-X_c, \varphi, \psi) \cdot P(0, Y_c, X_c) \cdot C(Z_c, -\theta_p, R_b) \cdot e4 \quad (1)$$

де  $C(Z_c, -\theta_p, R_b)$  – циліндричний модуль інструментальної поверхні;  $P(0, Y_c, X_c)$  – прямокутний модуль переносу;  $S(-X_c, \psi, \varphi)$  – сферичний модуль орієнтації;  $C(0, \theta, 0)$  – циліндричний модуль формоутворення;  $\psi, \varphi$  – кути повороту шліфувального круга;  $X_c, Y_c, Z_c$  – розміри розташування сферичного шарніра;  $\theta, \theta_p$  – параметри поверхні ріжучого інструмента;  $R_b$  – радіус розташування деталей в барабані подачі виробів.

Остаточна точність торцевих поверхонь деталей формується колом найбільшого радіуса.

Радіус-вектор поверхні деталі:

$$R_{\text{det}}(\theta_0, \theta_p, \theta) := C(0, \omega, 0) \cdot C_t(-R_b, \theta_0, 0) \cdot P(-Z_c, -Y_c, -X_c) \cdot S(-\varphi, -\psi, X_c) \cdot R_{\text{instr}}(\theta_p, \theta) \quad (2)$$

де  $S(-\varphi, -\psi, X_c)$  – сферичний модуль орієнтації;  $P(-Z_c, -Y_c, -X_c)$  – прямокутний модуль переносу;  $C_t(-R_b, \theta_0, 0)$  – циліндричний модуль формоутворення;  $C(0, \omega, 0)$  – циліндричний модуль, що відповідає за

орієнтацію деталі відносно напрямку подачі;  $\omega$  – обертання деталі;  $\theta_0$  – кутова координата положення заготовки відносно системи координат круга.

Радіус-вектор кола найбільшого  $R_{\max}$  радіуса:

$$R_{\max}(\theta) := C(Z_{\max}, \theta, R_{\max}) \cdot e^4, \quad (3)$$

де  $R_{\max}$  – максимальний радіус шліфувального круга;  $\theta$  – кутовий параметр шліфувального круга;  $Z_{\max}$  – максимальне значення висоти шліфувального круга, мм.

Рівняння однопараметричного огинання має вигляд:

$$\frac{\partial \bar{R}_{\text{det}}}{\partial \theta} \times \frac{\partial \bar{R}_{\text{det}}}{\partial \theta_k} \cdot \frac{\partial \bar{R}_{\text{det}}}{\partial \theta_o} = 0. \quad (4)$$

На рис. 2, а зображено відхилення від площинності торця штовхача при обробці шліфувальним кругом з плоскою торцевою поверхнею.

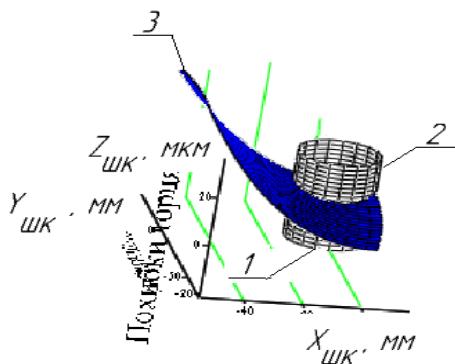


Рисунок 2 – Точність формоутворення торця штовхача при обробці шліфувальним кругом без калібруючої ділянки

На рис. 3 наведено графік похибки формоутворення торця штовхача діаметром 28 мм (рис. 3) по контуру, де при обробці деталь фіксується та не обертається під час шліфування.

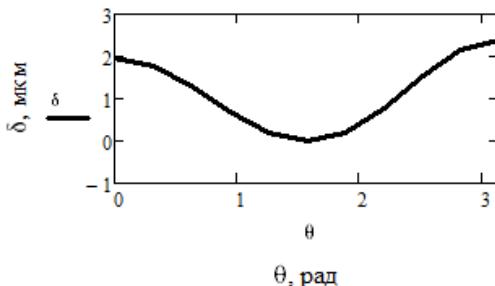


Рисунок 3 – Геометрична похибка формоутворення торців штовхачів

Як видно з рис. 3, величина похибки формоутворення збільшується зі збільшенням діаметра торців оброблюваної деталі.

На рис. 1 зображене спосіб фіксації штовхача 3, 5 в барабані подачі виробів 6 двостороннього торцешліфувального верстата при обробці орієнтованими шліфувальними кругами 1, 7 з плоскими торцевими поверхнями. Штовхачі 3, 5 (рис. 1) фіксуються за допомогою втулок 2, 4, вони дозволяють деталям обертатись, що підвищує точність формоутворення.

При обробці на двосторонньому торцешліфувальному верстаті торцевих поверхонь штовхача, що не обертається під час обробки (рис. 3) та обертається діаметром 28 мм (рис. 4), шліфувальними кругами з плоскими торцевими поверхнями.

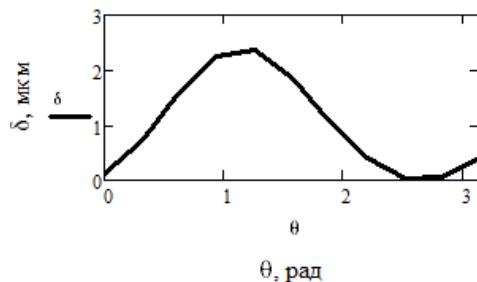


Рисунок 4 – Геометрична похибка формоутворення торців штовхачів (з обертанням)

На рис. 6 та рис. 7 зображене графіки залежності похибки формоутворення торця штовхача діаметром 8 мм, що не обертається (рис. 6) та обертається (рис. 7) під час обробки.

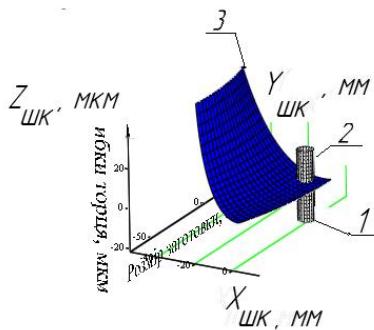


Рисунок 5 – Точність формоутворення торця штовхача діаметром 8мм.

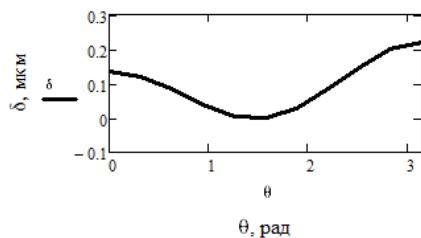


Рисунок 6 – Похибка формоутворення торця штовхача по координаті обробки

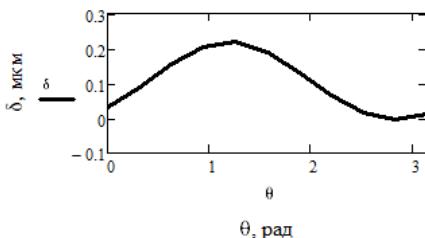


Рисунок 7 – Похибка формоутворення торця штовхача по координаті обробки (з обертанням)

Як видно з графіків (рис. 6 та 7) для торця діаметром 8 мм, під час обертання точність формоутворення більша.

Сили, які виникають при шліфуванні торцевих поверхонь, визначаються згідно робіт [9, 10].

Сили різання можна визначити за допомогою експериментально визначененої потужності за формулою [11]:

$$P_{z_i} = \frac{N_{\text{р3}_i}}{V_i}, \quad (6)$$

де  $N_{\text{р3}_i}$  – потужність шліфування торців деталей;

$V_i$  – швидкість різання, яка визначається з рівняння (7).

$$V_i = \frac{\pi \cdot D_i \cdot n}{60 \cdot 1000}, \quad (7)$$

де  $D_i$  – діаметр розташування центра деталі на поверхні шліфувального круга;

$n$  – частота обертання шліфувального круга.

Визначена експериментально активна потужність при шліфуванні зображена на рис. 8.

На рис. 8 зображене графік активної потужності, яка витрачається на шліфування торця штовхача.

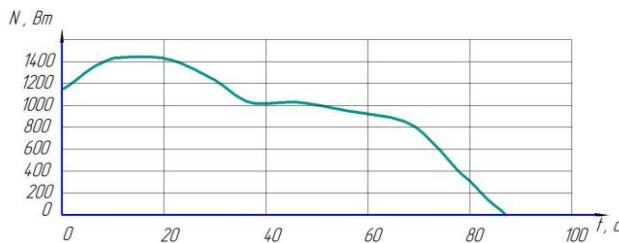


Рисунок 7 – Активна потужність

З виразу (6) визначимо сили різання та побудуємо графік залежності сили  $P_z$  від часу  $t$  (рис. 9).

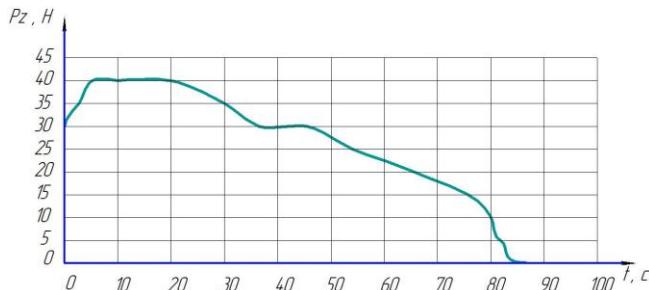


Рисунок 9 – Сила різання  $P_z$

При вході деталі в зону обробки виникає перехідний процес [12], що призведе до збільшення похибки обробки деталі, що виходить з зони обробки, тому потрібно уникати одночасного входу однієї деталі в зону обробки та виходу іншої. Під час входу деталі в зону обробки, формоутворення деталі на виході з зони обробки не повинно здійснюватися. Тому в зоні шліфування доцільна обробка парної кількості деталей, що забезпечить циклічність процесу. Невелика відстань між отворами в барабані, дозволить скомпенсувати ударні навантаження за рахунок чергування великих та малих діаметрів торців штовхачів.

### Висновок

Запропоновано модульне 3D-моделювання інструментів, процесів зняття приспуску та формоутворення торцевих поверхонь деталей. Зроблено розрахунок точності формоутворення торців штовхачів, що не обертаються та обертаються під час обробки.

Проведено дослідження процесу шліфування торців штовхачів, способу кріплення штовхачів, виконано 3D-моделювання впливу способу фіксації штовхачів в барабані подачі виробів, на геометричну точність формоутворення. При кріпленні штовхачів нерухомо у втулках забезпечується підвищення симетричності торців, але збільшується геометрична похибка формоутворення. При обертанні деталей під час обробки геометрична точність формоутворення буде більше.

Також запропоновано розташовувати кріплення деталей в барабані подачі виробів почергово установлюючи менший та більший діаметри, що дозволить забезпечити високу точність формоутворення, продуктивність та ефективність обробки деталей. Все це створює передумови для створення нових високоефективних технологій та способів шліфування торців деталей та їх подальшому впровадженню у виробничі процеси на промисловості.

**Список використаних джерел:** 1. Грабченко А.И., Кальченко В.И., Кальченко В.В. Шлифование со скрещивающимися осями инструмента и детали (Монография). – Чернигов: ЧГТУ, 2009.– 356 с. 2. Кальченко В.В. Наукові основи ефективного шліфування зі скрещеними осями абразивного інструменту та деталі // Дисертація докт. техн. наук. Харків: НТУ «ХПІ». – 2006. – 489 с. 3. Saturn. Торцевое шлифование спаренными шлифовальными кругами: [Журнал для клиентов фирмы «Junkermaschinen】 / ErwinJunker: Maschinenzfabric GmbH, Junkerstraße 2, Postfach 25. D 77787. – Nordrash, Germany, 2005 – 8 с. 4. Кальченко В.И., Погиба Н.Н., Кальченко Д.В. Определение составляющих силы резания при глубинном шлифовании поверхностей вращения ориентированным эльборовым кругом // Сверхтвердые материалы: научно- теоретический журнал, 2012. – №2(196). – С. 58-73. 5. Volodimir Kalchenko, Andrij Yeroshenko and others Determination Of Cutting Forces In Grinding With Crossed Axes Of Tool And Workpiece // Acta mechanica et automatica, 2017. – vol.11 no.1. – pp. 58-63. 6. Шахновский, С.С. Силы при двустороннем торцевшлифовании // Станки и инструмент. 1973. – № 1. – С. 20-21. 7. Вайнер Л. Г. Моделирование сил резания и характеристик съема приспуска при двустороннем шлифовании торцов одиночной заготовки / Л.Г. Вайнер // Новые материалы и технологии в ма- шиностроении. Сборник научных трудов по итогам международной научно-технической конференции. Вып. 14.

- Брянск: БГИТА, 2011. – С. 14-17. **8.** Каминская В.В., Вайнер Л.Г. Расчетное определение сил резания при обработке торцов роликов на двухстороннем торцешлифовальном станке. – Повышение эффективности использования технологического оборудования, гибких автоматизированных станочных комплексов: Тез. докл. науч.-техн. конф. – Комсомольск на Амуре: ХЦНТИ, 1985, с. 12-13. **9.** Кальченко В.І., Кальченко В.В., Следникова О.С. Дослідження процесу шліфування торців орієнтованих деталей профільованими кругами // Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – Черкаси: ЧДТУ. – 2016. – №4(2016). С. 72-82. **10.** Филимонов Л.Н. Плоское шлифование / Л.Н. Филимонов – Л.: Машиностроение, 1985. – 109 с. **11.** Кальченко В.І., Венжега В.І. і ін. Теоретичне та експериментальне дослідження процесів зняття припуску, зносу кругів, точності формоутворення та теплонапруженості під час шліфування торців деталей // Технічні науки та технології : науковий журнал / Чернігів. нац. технол. ун-т. – Чернігів: Чернігів. нац. технол. ун-т. – 2016. – № 4 (6). – С. 25-34. **12.** Кудинов, В.А. Динамика станков / В.А. Кудинов. – М.: Машиностроение, 1967. – 359 с. *Volodimyr Kalchenko, Andrij Yeroshenko and others Determination Of Cutting Forces In Grinding With Crossed Axes Of Tool And Workpiece // Acta mechanica et automatica*, 2017. – vol.11 no.1. – pp. 58-63. **13.** Кальченко В.І., Кальченко В.В. і ін. Дослідження способу шліфування валків стрічкопрокатних станів зі схрещеними осями інструмента та деталі // «Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки» – Черкаси: ЧДТУ, 2016. – №4/2016. – С. 80-88. **14.** Кальченко В.І., Кальченко В.В. і ін. Теоретичне та експериментальне дослідження процесів зняття припуску, зносу круга, точності формоутворення та теплонапруженості при шліфуванні циліндричних та ступінчатих валів зі схрещеними осями деталі та круга // Технічні науки та технології: науковий журнал. / Черніг. нац. технол. ун-т. – Чернігів: Чернігів. нац. технол. ун-т, 2016. – №4(6). – С. 35-43. **15.** Горелов В.А. Исследование сил резания в процессе шлифования титанового сплава ВТ3-1 / В.А. Горелов, М.В. Жуплов, Д.М. Фадин, М.Г. Яко-влев // Вестник МГТУ «Станкін». – 2012. – №1. – С. 73-77. **16.** Братан С.М. Разработка математической модели, учитывающей влияние отклонения профиля инструмента на динамику процесса врезного комбинированного шлифования / С.М. Братан, Д.А. Каинов, Н.А. Минаев // Вісник СєвНТУ. Серія: Машиноприладобудування та транспорт. – 2010. – Вип. 111. – С. 17-25. **16.** Горелов, В.А. Исследование сил резания в процессе шлифования титанового сплава ВТ3-1 / В.А. Горелов, М.В. Жуплов, Д.М. Фадин, М.Г. Яковлев // Вестник МГТУ «Станкін». – 2012. – №1. – С. 73-77. **17.** Долматов, А.И. К вопросу формализации абразивного инструмента при получении аналитических зависимостей для расчета функциональных характеристик процесса шлифования / А.И. Долматов, С.Н. Нижник, М.А. Курин // Авиационно-космическая техника и технология. – 2011. – №2. – С. 31–35. **18.** Volodimyr Kalchenko, Andrij Yeroshenko and others Determination Of Cutting Forces In Grinding With Crossed Axes Of Tool And Workpiece // Acta mechanica et automatica, 2017. – vol.11 no.1. – pp. 58-63. **19.** Кальченко В.І., Кальченко В.В. і ін. Дослідження способу шліфування валків стрічкопрокатних станів зі схрещеними осями інструмента та деталі // «Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки» – Черкаси: ЧДТУ, 2016. – №4/2016. – С. 80-88. **20.** Кальченко В.І., Кальченко В.В. і ін. Теоретичне та експериментальне дослідження процесів зняття припуску, зносу круга, точності формоутворення та теплонапруженості при шліфуванні циліндричних та ступінчатих валів зі схрещеними осями деталі та круга // Технічні науки та технології: науковий журнал. / Черніг. нац. технол. ун-т. – Чернігів: Чернігів. нац. технол. ун-т, 2016. – №4(6). – С. 35-43.

**Bibliography (transliteratrated):** **1.** Grabchenko A.I., Kalchenko V.I., Kalchenko V.V. Shlifovanie so skreshchivaiushchimisia osiami instrumenta i detalii . – Chernigov: ChGTU, 2009. – 356 s. **2.** Kalchenko V.V. Naukovi osnovy efektyvnoho shlifuvannia zi skhreshchenymy osiamy abrazivynoho instrumentu ta detali // Dyssertatsiia dokt. tekhn. nauk. Kharkiv: NTU «KhPI», – 2006. – 489 s. **3.** Saturn. Tortcevoe shlifovanie sparennymi shlifoval'nyimi krugami: [Zhurnal dlja klientov firmy «Junkermaschinen»] / ErwinJunker: Maschinenfabric GmbH, Junkerstraße 2. Postfach 25. D 77787. – Nordrash, Germany, 2005 – 8 s. **4.** Kalchenko V.I., Pogiba N.N., Kalchenko D.V. Opredelenie

sostavliaushchikh sily rezaniia pri glubinnom shlifovanii poverkhnostei vrashcheniia orientirovannym elborovym krugom // Sverkhtverdye materialy: nauchno- teoretycheskii zhurnal, 2012. – №2(196). – S. 58-73. **5.** Kalchenko V.V., Yeroshenko A.M., Boiko S.V. & Sira N.M. (2017) Determination Of Cutting Forces In Grinding With Crossed Axes Of Tool And Workpiece. *Acta mechanica et automatica*, vol.11 no.1. – pp. 58-63. **6.** Shakhnovskii, S.S. Sily pri dvustoronnem tortceshlifovanii // Stanki i instrument. 1973. -№ 1. - S. 20 – 21. **7.** Vainer L. G. Modelirovanie sil rezaniia i kharakteristiki sema pripuska pri dvustoronnem shlifovanii tortcov odinochnoi zagotovki / L.G. Vainer // Novye materialy i tekhnologii v mashinostroenii. Sbornik nauchnykh trudov po itogam mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferencii. Vypusk 14. - Briansk: BGITA, 2011.-S. 14-17. **8.** Kaminskaia V.V., Vainer L.G. Raschetnoe opredelenie sil rezaniia pri obrabotke tortcov rolikov na dvukhstорonnem tortceshlifovalnom stanke. - Povyshenie effektivnosti ispolzovaniia tekhnologicheskogo oborudovaniia, gibkikh avtomatizirovannykh stanochnykh kompleksov: Tez. dokl. nauch.- tekhn. konf. - Komsomolsk –na-Amure: KhTcNTI, 1985, s. 12-13. **9.** Kalchenko V.I., Kalchenko V.V., Sliednikova O.S. Doslidzhennia protsesu shlifuvannia tortsiv orientovanykh detalei profilovanym kruhamy // Visnyk Cherkaskoho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu. Seriia: Tekhnichni nauky. – Cherkasy: ChDTU. – 2016. – №4(2016). S. 72-82 **10.** Filimonov L.N. Ploskoe shlifovanie / L.N. Filimonov – L.: Mashinostroenie, 1985. – 109 s. **11.** Kalchenko V.I., Venzheha V.I. i in. Teoretychna ta eksperimentalne doslidzhennia protsesiv znyattia pripusku, znosu kruhiv, tochnosti formoutvorennia ta teplonapruzenosti pid chas shlifuvannia tortsiv detalei // Tekhnichni nauky ta tekhnolohii : naukovyy zhurnal / Chernihiv. nats. tekhnol. un-t. – Chernihiv : Chernihiv. nats. tekhnol. un-t. – 2016. – № 4 (6). – S. 25-34. **12.** Kudinov, V.A. Dinamika stankov / V.A. Kudinov. – M.: Mashinostroenie, 1967. - 359 s. **13.** Volodimir Kalchenko, Andrij Yeroshenko and others Determination Of Cutting Forces In Grinding With Crossed Axes Of Tool And Workpiece // *Acta mechanica et automatica*, 2017. – vol.11 no.1. – pp. 58-63 . **14.** Kal'chenko V.I., Kal'chenko V.V. i in. Teoretychna ta eksperimentalne doslidzhennya protsesiv znyattya pripusku, znosu kruha, tochnosti formoutvorennia ta teplonapruzenosti pry shlifuvanni tsylindrychnyk ta stupinchatykh valiv zi skhreshchenymy osyamy detalii ta krahu // Tekhnichni nauky ta tekhnolohiyi: naukovyy zhurnal. / Chernih. nats. tekhnol. un-t. – Chernihiv : Chernih. nats. tekhnol. un-t, 2016. – 4(6). – S. 35-43. **15.** Horelov, V.A. Yssledovanye syl rezannya v protsesse shlyfovannya tytanovoho splava VT3-1 / V.A. Horelov, M.V. Zhuplov, D.M. Fadyn, M.H. Yako-vlev // Vestnyk MHTU «Stankyn». – 2012. – №1. – S. 73–77. **16.** Bratan S.M. Razrabotka matematycheskoy modely, uchytivayushchey vlyyanie otklonenyia profilya ynstrumenta na dynamiku protsessu vreznoho kombynyrovanoho shlyfovannya / S.M. Bratan, D.A. Kaynov, N.A. Mynaev // Visnyk SevNTU. Seriya: Mashynopryladobuduvannya tatransport. – 2010. – Vyp. 111. – S. 17-25. **17.** Horelov, V.A. Yssledovanye syl rezannya v protsesse shlyfovannya tytanovoho splava VT3-1 / V.A. Horelov, M.V. Zhuplov, D.M. Fadyn, M.H. Yako-vlev // Vestnyk MHTU «Stankyn». – 2012. – 1. – S. 73-77. **18.** Dolmatov, A. K voprosu. Y formalyzatsyy abrazivnoho ynstrumenta pry poluchenyy analytycheskykh zavysymostey dlya raspcheta funktsional'nykh kharakterystyk protsessu shlyfovannya / A.Y. Dolmatov, S.N. Nyzhnyk, M.A. Kuryn // Avyatsyonno-kosmycheskaya tekhnika y tekhnolohyya. – 2011. – 2. – S. 31-35. **19.** Volodimir Kalchenko, Andrij Yeroshenko and others Determination Of Cutting Forces In Grinding With Crossed Axes Of Tool And Workpiece // *Acta mechanica et automatica*, 2017. – vol.11 no.1. – rr. 58-63 Kal'chenko V.I., Kal'chenko V.V. i in. Doslidzhennia sposobu shlifuvannya valkiv strichkoprotkatnykh staniv zi skhreshchenymy osyamy instrumenta ta detalii // «Visnyk Cherkas'koho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu. Seriya: Tekhnichni nauky» – Cherkasy: ChDTU, 2016. – №4/2016. – S. 80-88. **20.** Kal'chenko V.I., Kal'chenko V.V. i in. Teoretychna ta eksperimentalne doslidzhennya protsesiv znyattya pripusku, znosu kruha, tochnosti formoutvorennia ta teplonapruzenosti pry shlifuvanni tsylindrychnyk ta stupinchatykh valiv zi skhreshchenymy osyamy detalii ta krahu // Tekhnichni nauky ta tekhnolohiyi: naukovyy zhurnal. / Chernih. nats. tekhnol. un-t. – Chernihiv : Chernih. nats. tekhnol. un-t, 2016. – №4(6). – S. 35-43.

УДК 621.924.5

Д. В. Криворучко, д-р техн. наук, В. Г. Евтухов, канд. техн. наук,  
І. Г. Чижов, Суми, Україна

## ОЦЕНКА ОБРАБАТЫВАЕМОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ РЕЗАНИЕМ

*Метою цієї роботи є вивчення можливості оцінки оброблюваності різанням на основі на даних про фізико-механічні властивості конструкційних матеріалів.*

Використовуючи діаграми істинних напружень різних конструкційних матеріалів встановлена пряма пропорційна залежність між теоретичною кількістю енергії руйнування одиниці об'єму конструкційних матеріалів та їх границею міцності на розтягання. Однак реальний процес різання супроводжується втратами енергії на тертя. Ці втрати становлять в середньому для більшості конструкційних матеріалів (35 - 45%). Не дивлячись на це збереження у загальному пропорційного зв'язку між величиною границі міцності на розтягання і питомою роботою, що витрачається при різанні, дозволяє використовувати цей критерій для оцінки оброблюваності конструкційних матеріалів.

**Ключові слова:** границя міцності на розтягання, питома робота руйнування, сили різання, допустима швидкість різання

*Целью настоящей работы является изучение возможности оценки обрабатываемости резанием на основе на данных о физико-механических свойствах конструкционных материалов.*

Используя диаграммы истинных напряжений различных конструкционных материалов установлена пряма пропорциональная зависимость между теоретическим количеством энергии разрушения единицы объема конструкционных материалов и их времененным сопротивлением на растяжение. Однако реальный процесс резания сопровождается потерями энергии на трение. Эти потери составляют в среднем для большинства конструкционных материалов (35 - 45 %). Несмотря на это, сохранение общей пропорциональной связи величины временного сопротивления на растяжение с удельной работой, затрачиваемой при резании позволяет использовать этот критерий для оценки обрабатываемости конструкционных материалов.

**Ключевые слова:** временное сопротивление на растяжение, удельная работа разрушения, силы резания, допустимая скорость резания

*The purpose of this work is to study the possibility of estimation of machinability based on physico-mechanical properties of structural materials.*

Using the diagrams of the true stresses of various structural materials, a linear relationship is found between the theoretical amount of energy for fracture of a unit volume of structural materials and their tensile strength. However, the actual cutting process is accompanied by energy losses to friction. These losses range from 35 to 45% for most structural materials in average. Thus, maintaining the overall linear relationship of the value of the tensile strength with the specific work consumed during cutting makes it possible to use this criterion for evaluating the machinability of structural materials.

**Keywords:** tensile strength, specific fracture work, cutting force, permissible cutting speed

В современном производстве основным фактором выбора рационального метода обработки является экономическая эффективность его применения в заданных условиях для заданных материалов.

---

© Д. В. Криворучко, В. Г. Евтухов, И. Г. Чижов, 2017

Сравнение экономической эффективности резанием различных конструкционных материалов часто выполняют по критериям обрабатываемости. Данное понятие определяет сумму взаимосвязанных физико-механических свойств материала, отвечающих за удаление припуска и целенаправленное формирование технологических показателей механической обработки, что связано, в первую очередь, с различными параметрами напряженности протекания процесса резания. [1].

В современном машиностроении используется огромное количество различных конструкционных материалов, отличающихся своими основными физико-механическими характеристиками такими как предел текучести при растяжении  $\sigma_t$ , временное сопротивление (предел прочности при растяжении)  $\sigma_b$ , твердость по Бринеллю HB, относительное удлинение образца при разрыве  $\delta$ , относительное сужение площади поперечного сечения образца при разрыве  $\psi$  и др. Из опыта известно, что обрабатываемость резанием конструкционных материалов также различна.

Существуют различные способы оценки обрабатываемости материалов. Считают, что обрабатываемость связана с изнашивающим действием, оказываемым материалом на контактные поверхности инструмента [2]. В итоге, одной из основных характеристик обрабатываемости материалов рассматривают допускаемую скорость резания, которая соответствует нормативному значению периода стойкости инструмента [1, 2]. Оценка обрабатываемости может быть выполнена по стойкости инструмента, производительности обработки в заданных условиях и другим критериям. Более комплексная оценка обрабатываемости конструкционных материалов, на наш взгляд, осуществляется по коэффициенту полезного действия системы резания [3]. Однако, все эти подходы предполагают наличие обширных и трудоемких экспериментальных исследований по определению функциональных зависимостей сил резания от режимов резания в различных условиях.

Поэтому **целью настоящей работы** является изучение возможности оценки обрабатываемости резанием на основе на данных о физико-механических свойствах конструкционных материалов.

В этом контексте интересной является идея оценки обрабатываемости резанием по теоретическим затратам энергии на разрушение или удельной работе разрушения, затраченной на снятие заданного припуска, отнесенного к объему срезанного при этом материала [3, 4]. Данный показатель обрабатываемости резанием может послужить классификационной характеристикой для различных конструкционных материалов и быть использован для оптимизации технологических процессов механической обработки. Вместе с тем, описанные в указанных работах подходы для определения энергии разрушения при резании основываются на

экспериментальных данных о силах резания. С другой стороны, используя диаграммы растяжения конструкционных материалов в истинных напряжениях [5] можно определить теоретическое количество энергии для разрушения единицы объема ( $A_{\text{теор}}$ ) заданного металла. При использовании указанных диаграмм теоретическая работа разрушения определяется по формуле [4]:

$$A_{\text{теор}} = \frac{S_b \Psi_k}{2} + \frac{S_b + S_k}{2} (\Psi_k - \Psi_e) + \frac{S_k + S_1}{2} (\Psi_1 - \Psi_k), \quad (1)$$

где  $S_b$  и  $S_k$  – истинные напряжение в моменты начала образования шейки на образце и разрушения образца при растяжении соответственно;  $S_1$  – истинное напряжение разрушению;  $\Psi_b$  и  $\Psi_k$  – относительное сужение в моменты начала образования шейки на образце и разрушения образца при растяжении соответственно;  $\Psi_1$  – относительное сужение после разрушения образца.

Результаты расчетов по определению теоретической работы разрушения различных конструкционных материалов на основе справочных данных о их физико-механических свойствах приведены в таблице 1.

Как видно из рис. 1, наблюдается прямо пропорциональная зависимость, выражаемая единым уравнением (2) для всех представленных в таблице 1 различных по химическому составу и физико-механическим свойствам групп конструкционных материалов. Аппроксимация дает уравнение:

$$A_{\text{теор}} = \frac{(\sigma_b + 6)}{0.61}, \quad (2)$$

Расхождение полученных результатов для различных групп металлов не превышает 15 %, что вполне допустимо. Исключение составляют группы цветных сплавов, где особняком расположены алюминиевые сплавы АЛ-9 и АК4-1, сильно отличающийся по своему химическому составу и физико-механическим свойствам от группы цветных сплавов на основе меди. В целом, полученные отличия можно объяснить и некоторыми расхождениями значений их физико-механических свойств, представленных в различных изданиях марочников сталей и сплавов.

Фактическую механическую работу разрушения поверхностного слоя заготовки в процессе резания  $A_{\text{мех}}$ , в частности, при точении образцов из различных конструкционных материалов, можно определить по силам резания из зависимости [4]:

$$A_{\text{мех}} = P_z L \cos \alpha, \quad (3)$$

где  $P_z$  – тангенциальная составляющая силы резания при точении образцов;

$L$  – длина срезаемой стружки;

$\cos \alpha = \tan^{-1} \frac{S_0}{\pi d}$  – угол между направлениями действия силы резания  $P_z$  и поверхностью резания;

$S_0$  – подача инструмента на 1 оборот заготовки;

$d$  – диаметр обрабатываемой заготовки.

Таблица 1 – Определение теоретической работы разрушения различных конструкционных материалов

№ п/п	Обрабатываемый материал (в состоянии поставки)	Механические свойства			Теоретическая работа разрушения ( $A_{\text{теор}}$ ), кгс·мм/мм <sup>3</sup>
		$\sigma_b$ , МПа (кгс/мм <sup>2</sup> )	НВ 10 <sup>-1</sup> , МПа	$\Psi$ , %	
1	ШХ15	648 (66)	195	40	106,3
2	40Х13	637 (65)	150	30	102,5
3	60С2	1029 (105)	269	25	184,5
4	ВТ3-1	932 (95)	190	38	171,1
5	50	559 (57)	190	38	107
6	9ХС	775 (79)	240	55	128,4
7	38Х2МЮА	726 (74)	250	40	120,4
8	СЧ21-40	343 (35)	195	28	56,3
9	12Х18Н10Т	549 (56)	169	55	102,8
10	12Х13	588 (60)	190	45	95,3
11	КЧ37-12	363 (37)	140	13	68,2
12	20ХМ	785 (80)	179	50	132,2
13	Ст3сп	343 (35)	120	55	64,7
14	15Г	402 (41)	163	55	77
15	Л80	304 (31)	110	50	56,8
16	М1	226 (23)	90	35	39,1
17	БрОЦС5-5-5	196 (20)	70	34	52,3
18	АЛ-9	196 (20)	60	7,1	67,9
19	У8	638 (65)	180	24	122
20	ВТ9	1079 (110)	225	32	182,8
21	20	520 (53)	120	55	98,3
22	40ХН	559 (57)	180	35	107,3
23	ВЧ50-1,5	491 (50)	220	14	81,1
24	Р18	824 (84)	220	12	143
25	Нейзильбер МНЦ15-20	569 (58)	160	54	106
26	АК4-1	392 (40)	109	17	95,1

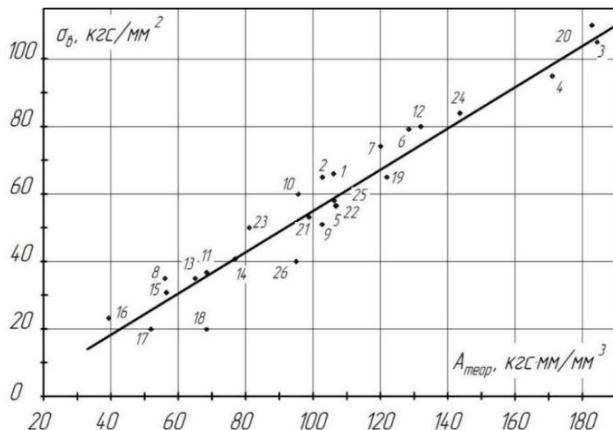


Рисунок 1 – Зависимость теоретической работы разрушения  $A_{\text{теор}}$  от временного сопротивления  $\sigma_v$  для различных конструкционных материалов (нумерация материалов согласно табл. 1)

Результаты проведенных расчетов представлены в табл. 2. Здесь рассматривались те же, что и в табл. 1, конструкционные материалы (их нумерация обозначена со «звездочкой»). При этом, силы резания определялись для трех переходов: для чернового, получистового и чистового точения.

При черновом точении глубина резания составляла 2 мм, подача резца – 0,8 мм/об, скорость резания обеспечивалась в пределах 55 – 90 м/мин; при получистовом точении глубина резания составляла 0,8 мм, подача резца – 0,24 мм/об, а скорость резания обеспечивалась в пределах 80 – 140 м/мин; при чистовом точении глубина резания составляла 0,2 мм, подача резца – 0,1 мм/об, скорость резания обеспечивалась в пределах 130 – 180 м/мин. В качестве режущего инструмента использовались проходные резцы с главным углом в плане  $45^\circ$ , оснащенный пластинками из твердого сплава Т15К6 и ВК8, а также быстрорежущей стали Р6М5. В результате при черновом точении площадь среза составляла для всех образцов  $1,6 \text{ mm}^2$ , объем 1 витка срезаемого слоя –  $301,4 \text{ mm}^3$ ; при получистовом точении площадь среза –  $0,19 \text{ mm}^2$ , объем 1 витка срезаемого слоя –  $33,4 \text{ mm}^3$ ; при чистовом точении площадь среза –  $0,02 \text{ mm}^2$ , объем 1 витка срезаемого слоя –  $3,4 \text{ mm}^3$ .

Значения сил резания определялись по известным эмпирическим зависимостям [2, 6] и представлены для соответствующих режимов резания в табл. 2. В результате, удельная механическая работа разрушения, определяемая по силам резания, составила:

$$A_{\text{уд.мех.}} = \frac{A_{\text{мех}}}{V}, \quad (4)$$

где  $V$  – объем срезаемого металла.

Таблица 2 – Удельная механическая работа разрушения при черновом, получистовом и чистовом точении

№ п/п	Обраба- тываемый материал (в состоянии поставки)	Силы резания ( $P_z$ ), кгс			Работа разрушения ( $A_{\text{мех}}$ ), кгс·мм			Удельная работа разрушения ( $A_{\text{уд.мех}}$ ), кгс·мм/мм <sup>3</sup>		
		Черн. точение	П/чист. точение	Чист. точение	Черн. точение	П/чист. точение	Чист. точение	Черн. точение	П/чист. точение	Чист. точение
		$P_{z1}$	$P_{z2}$	$P_{z3}$	$A_{\text{мех.1}}$	$A_{\text{мех.2}}$	$A_{\text{мех.3}}$	$A_{\text{уд.мех.1}}$	$A_{\text{уд.мех.2}}$	$A_{\text{уд.мех.3}}$
1*	ШХ15	247,9	37,5	4,8	46630	6573,8	817,9	154,7	196,8	240,6
2*	40Х13	312,1	49,9	6,6	58709,8	8754,4	1126,9	194,8	262,1	331,5
3*	60С2	330,5	49,9	6,4	60779	8732,5	1080,8	201,7	261,5	317,9
4*	ВТ3-1	285,6	43,3	5,2	53807	7603	888,5	178,5	227,6	261,3
5*	50	256,8	38	4,5	48230,4	6680,4	769,6	160	199	226,1
6*	9ХС	278,4	42,9	5,4	52339,2	7520,4	919,6	173,7	225,2	270,5
7*	38Х2МЮА	272,9	41,2	5,3	51295,8	7219,6	902,6	170,2	216,2	265,5
8*	СЧ21-40	156,4	25	3,1	29465,8	4274,1	534,3	97,8	128	157,1
9*	12Х18Н10Т	277,5	44,4	5,9	52186,5	7792,2	1006	173,2	233,3	295,9
10*	12Х13	291,3	46,6	6,2	54795,8	8175,4	1057,1	181,8	244,8	310,9
11*	КЧ37-12	144,6	23,1	2,9	27184,8	4042,5	493	90,2	121	145
12*	20ХМ	279,8	42,2	5,4	52623	7397,7	919,6	174,6	221,5	270,5
13*	Ст3сп	145,6	22,4	2,8	27372,8	3920	476,8	90,8	117,4	140,3
14*	15Г	217,5	32,8	4,3	40889,1	5740,1	730,6	135,6	171,8	214,9
15*	Л80	116,2	18,6	2,3	21895	3269	397	72,6	97,9	116
16*	М1	104	16,6	2,1	19590,2	2924,8	355,2	65	87,6	104,5
17*	БрОЦС-5-5	90	14,4	1,8	16956,3	2531,6	307,4	56,3	75,8	90,4
18*	АЛ-9	137,7	22	2,8	25942,7	3873,2	470,4	86,1	116	138,2
19*	У8	245,1	37	4,7	46103,3	6482,4	799,9	153	194,1	235,3
20*	ВТ9	314	47,6	5,7	59187,7	8363,3	977,4	196,4	250	287,5
21*	20	242,3	37,8	4,6	45639,9	6650,5	777,9	151,4	199,1	228,8
22*	40ХН	256,8	38,4	4,6	48378,3	6745,9	777,7	160,5	202	228,7
23*	ВЧ5-1,5	168,9	27	3,4	31753,2	4730,4	579,4	105,4	141,6	170,4
24*	Р18	300,2	45,4	5,8	56437,6	7954,1	988,3	187,3	238,2	290,7
25*	Нейзильбер МНЦ15-20	142,4	25,7	3,6	26772	4497,5	613,7	89,8	135,7	181,5
26*	АК4-1	187	29,9	3,9 6	34956,5	5232,5	665,3	115,9	156,7	195,7

Как видно из табл. 2, при переходе от чернового к чистовому точению работа разрушения  $A_{\text{мех}}$  резко снижается, а удельная работа разрушения  $A_{\text{уд.мех}}$ , наоборот, возрастает, указывая на интенсификацию процесса резания.

На рис. 2 представлены зависимости средней удельной работы разрушения  $A_{\text{уд.мех.ср.}}$ , определенным по силам резания, от временного сопротивления  $\sigma_b$  для различных конструкционных материалов, рассмотренных ранее в табл. 1.

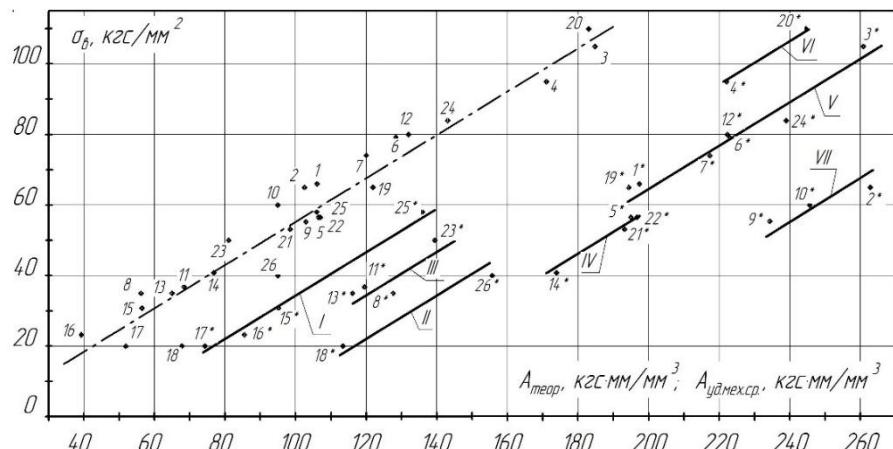


Рисунок 2 – Зависимость средней удельной работы разрушения  $A_{\text{уд.мех.ср.}}$  (—) и теоретической удельной работы разрушения  $A_{\text{теор.}}$  (— · — · —) от временного сопротивления  $\sigma_b$  для различных групп материалов

Здесь средняя удельная работа разрушения  $A_{\text{уд.мех.ср.}}$  определялась по зависимости (5):

$$A_{\text{уд.мех.ср.}} = \sum_{i=1}^3 \frac{A_{\text{уд.мех.}i}}{3}, \quad (5)$$

где  $i$  – этап обработки: черновой, получистовой, чистовой.

В отличии от рис. 1, на котором теоретическая работа разрушения представлена для всех групп рассматриваемых металлов в виде одной прямой линии  $A_{\text{теор.}}$ , на рис. 2 данные сгруппированы по химическому составу конструкционных материалов и аппроксимированы отдельными прямыми. На рис. 2 римскими цифрами обозначены следующие группы конструкционных материалов, представленные ранее в табл. 1 и 2:

I – цветные сплавы на основе меди;

II – цветные сплавы на основе алюминия;

III – чугуны (серые, ковкие, высокопрочные), стали углеродистые обыкновенного качества;

IV – стали конструкционные углеродистые качественные и низколегированные;

V – стали быстрорежущие, инструментальные углеродистые и легированные, подшипниковые и рессорно-пружинные, жаропрочные релаксационно-стойкие и конструкционные низколегированные;

VI – титановые сплавы;

VII – стали высоколегированные, коррозионно-стойкие, жаропрочные (нержавеющие).

Наблюдается общая закономерность: наклон всех прямых одинаков и параллелен теоретической прямой (2). Таким образом наблюдается та же прямо пропорциональная зависимость между удельной работой разрушения  $A_{уд.мех.ср.}$  и времененным сопротивлением  $\sigma_v$  в пределах одной группы конструкционных материалов. Вместе с тем сравнение теоретической работы разрушения  $A_{теор}$  с удельной работой разрушения поверхностного слоя заготовки для различных металлов и сплавов по силам резания  $A_{уд.мех.ср.}$  показывает, что средняя удельная работа разрушения в процессе резания значительно превосходит затраты энергии на разрушение поверхностного слоя, определенные по истинным диаграммам напряжений для различных металлов. Соотношение между указанными работами разрушения можно оценить по коэффициенту соответствия  $K_c$  (коэффициенту выполнения полезной работы), определяемому зависимостью:

$$K_c = \frac{A_{теор}}{A_{уд.мех.ср.}}, \quad (6)$$

В табл. 3 представлены значения коэффициентов соответствия  $K_c$  для указанных в табл. 1 и 2 конструкционных материалов.

Таблица 3 – Значения коэффициентов соответствия для различных конструкционных материалов

Обрабатываемый материал	ШХ15	40Х13	60С2	ВГ3-1	50	9ХС	38Х2МЮА	СЧ21-40	12Х18Н10Т	12Х13	КЧ37-12	20ХМ	Ст3сп
№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$K_c$	0,54	0,39	0,71	0,74	0,55	0,58	0,55	0,44	0,44	0,39	0,58	0,66	0,56
$1-K_c$	0,46	0,61	0,29	0,26	0,45	0,42	0,45	0,56	0,56	0,61	0,42	0,34	0,44

Продолжение табл. 3

Обрабатываемый материал	15Г	Л80	M1	БрОЦ5-5-5	АЛ-9	У8	ВТ9	20	22	40ХН	ВЧ50-1,5	P18	Нейзильбер МНЦ15-20	АК4-1
№ п/п	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	
$K_c$	0,44	0,6	0,46	0,7	0,6	0,66	0,75	0,51	0,54	0,58	0,6	0,78	0,61	
$1-K_c$	0,56	0,4	0,54	0,3	0,4	0,34	0,25	0,49	0,46	0,42	0,4	0,22	0,39	

Указанное отличие в затратах работы на разрушение поверхностного слоя обрабатываемой заготовки связано с тем, что в процессе резания затраты энергии учитывают, как полезную (основную) работу деформирования и разрушения при резании, так и рассеиваемую энергию, не оказывающую полезного действия на процесс резания. В частности, это затраты на трение по передней и задней поверхности режущего инструмента, вызывающие износ последнего.

Если принять теоретическую работу разрушения материала заготовки, определенную по диаграммам истинных напряжений, за основную работу деформирования при резании металлов, то разница значений ( $1 - K_c$ ) определит потери на трение по передней и задней поверхности режущего инструмента, а также потери, связанные с не оптимальными условиями проведения процесса резания.

Как видно из табл. 3, указанные потери изменяются в достаточно широких пределах от (22 - 30) % для нейзильбера, оловянистой бронзы и титановых сплавов, отличающихся достаточно низкими потерями энергии на процесс резания, до (54 - 61) % потерь для меди, высоколегированных нержавеющих сталей, конструкционных легированных сталей, в частности, марганцовистых и других, отличающихся пониженной обрабатываемостью. Такое расхождение между долями полезной и рассеиваемой энергиями подтверждается и в работе Ярославцева В. М. [1]. Для основной же группы металлов потери энергии при разрушении материала составляют (35 - 45) %, что соответствует данным, представленным в работе В. Ф. Боброва [2]. Потери в пределах (35 - 45) % характерны и в целом для всей совокупности рассматриваемых конструкционных материалов.

Выводы:

1. Расчеты на основе диаграмм истинных напряжений и сил резания показали, что удельная механическая работа разрушения при резании прямо пропорциональна временному сопротивлению обрабатываемого конструкционного материала.

2. Реальный процесс резания сопровождается потерями энергии на трение, причем чем хуже обрабатываемость, тем больше потери на трение. Потери находятся в пределах от 22 до 61%, составляя в среднем для большинства конструкционных материалов (35 - 45) %.

3. Представленные данные показывают, что обрабатываемость резанием в заданных условиях в пределах одной группы конструкционных материалов может сравниваться на основе временного сопротивления обрабатываемых материалов. Этот критерий обеспечивает простоту принятия решений на практике. Вместе с тем сравнение обрабатываемости конструкционных материалов различных групп по этому критерию может дать значительную погрешность из-за непропорциональных потерь на трение. Поэтому необходим более комплексный критерий, учитывающий эти потери.

**Список использованных источников:** 1. Ярославцев, В. М. Энергетическая характеристика обрабатываемости материалов резанием / В. М. Ярославцев // technomag.edu.ru: Наука и образование: электронный научно-технический журнал МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2012. – С. 27-34. 2. Бобров, В.Ф. Основы теории резания металлов / В. Ф. Бобров. – М.: Машиностроение, 1975. – 344 с. 3. Швец, С. В. Системный анализ теории резания: монография / С.В. Швец. – Сумы: Изд-во СумГУ, 2009. – 212 с. 4. Акилов, А. И. Оценка обрабатываемости материалов по затратам энергии разрушения / А.И. Акилов, И. Г. Чижов, Ю.А. Геращенко, С. А. Майборода // Вестник СумГУ. – 2013. – № 1. – С. 114-119. 5. Марковец, М. П. Диаграммы истинных напряжений и расчет на прочность / М.П. Марковец. – М.: Оборонгиз, 1947. – 140 с. 6. Справочник технолога-машиностроителя в 2-х т. / под ред. А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. – Изд. 4-е, перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1985. – Т.2. – 496 с.

**Bibliography (transliteratrated):** 1. Jaroslavcev, V.M. Jenergeticheskaja harakteristika obrabatyvaemosti materialov rezaniem / V. M. Jaroslavcev // technomag.edu.ru: Nauka i obrazovanie: elektronnyj nauchno-tehnicheskiy zhurnal MGTU im. N. Je. Baumana. 2012. – S. 27-34. 2. Bobrov, V. F. Osnovy teorii rezaniya metallov / V.F. Bobrov. – M.: Mashinostroenie, 1975. – 344 s. 3. Shvets, S.V. Sistemnyj analiz teorii rezanija: monografija / S.V. Shvets. – Sumy: Izd-vo SumGU, 2009. – 212 s. 4. Akilov, A.I. Ocenna obrabatyvaemosti materialov po zatratam jenergii razrushenija / A.I. Akilov, I.G. Chizhov, Ju.A. Gerashchenko, S.A. Majboroda // Vestnik SumGU. – 2013. – № 1. – S. 114-119. 5. Markovets, M.P. Diagrammy istinnyh naprjazhenij i raschet na prochnost' / M.P. Markovets. – M.: Oborongiz, 1947. – 140 s. 6. Spravochnik tehnologa-mashinostroitelja v 2-h t. / pod red. A.G. Kosilovoj, R.K. Meshherjakova. – Izd. 4-e, pererab. i dop. – M.: Mashinostroenie, 1985. – T.2. – 496 s.

УДК 658.56

О.І. Куценко, Н.В. Ротань, О.Є. Яковенко, канд. техн. наук,  
Херсон, Україна

## ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ НА ОСНОВІ МІЖНАРОДНИХ ТА НАЦІОНАЛЬНИХ СТАНДАРТИВ

Запропоновано алгоритм процесу переходу до вимог ДСТУ ISO 9001:2015 для тих вищих навчальних закладів (ВНЗ), які створили, впровадили та сертифікували системи управління якістю (СУЯ) за ДСТУ ISO 9001:2009.

**Ключові слова:** стандарти ДСТУ ISO 9001:2015, система управління якістю, освітні послуги

Предложен алгоритм процесса перехода к требованиям ДСТУ ISO 9001:2015 для тех высших учебных заведений, которые создали, внедрили и сертифицировали системы управления качеством за ДСТУ ISO 9001:2009.

**Ключевые слова:** аудит, стандарты ГСТУ ISO 9001:2015, система управления качеством, образовательные услуги

*The algorithm of the process of transition to the requirements of DSTU ISO 9001:2015 is proposed for those higher educational institutions, which have created, implemented and certified quality management systems according to DSTU ISO 9001:2009.*

**Keywords:** are standards of DSTU ISO 9001:2015, control quality system, educational services

### Вступ

Основою стандартів системи якості серії ISO 9000 на даний час складають чотири міжнародні стандарти: ISO 9001:2015, ISO 9000:2015 ISO 9004:2009 (ISO 9004:2000) та ISO 19011:2011, що містять вимоги та рекомендації щодо розробки та запровадження ефективно діючої системи управління якістю [1-2].

Ці стандарти універсальні і застосовуються як у виробничій сфері, так і у сфері надання різного роду послуг.

В Україні було здійснено переклад і науково-технічне редактування міжнародних стандартів, та введені в дію Державні стандарти України: ДСТУ ISO 9001:2015 (до 15 вересня 2018 року в Україні діє ДСТУ ISO 9001:2009, перехідний період наказ УкрНДНЦ від 4 грудня 2015р., № 172), ДСТУ ISO 9000:2015, ДСТУ ISO 19011:2012, ДСТУ ISO 9004:2001.

Разом зазначені документи формують узгоджену серію стандартів [3], що сприяє взаєморозумінню в національній та міжнародній діяльності завдяки загальному визнанню підходів, принципів та методів управління якістю. Система управління якістю – це частина системи управління [2] ВНЗ, що спрямована на досягнення результатів відповідно до цілей у сфері якості, а також, щоб задовільнити потреби, очікування та вимоги усіх зацікавлених сторін.

Для створення та впровадження систем управління якістю навчальним закладам необхідно враховувати вимоги всієї серії стандартів зазначених вище, а для проведення безпосередньої сертифікації - ДСТУ ISO 9001:2015 Системи управління якістю. Вимоги. (ISO 9001:2015) (до 15 вересня 2018 року в Україні діє ДСТУ ISO 9001:2009, перехідний період наказ УкрНДНЦ від 4.12.2015 № 172).

### **Матеріал та результати дослідження**

В рамках дослідження пропонується розробити алгоритм процесу переходу до вимог ДСТУ ISO 9001:2015 для тих вищих навчальних закладів (ВНЗ), які створили, впровадили та сертифікували СУЯ за ДСТУ ISO 9001:2009 [3].

ДСТУ ISO 9001:2015 не вимагає застосування його структури та термінології до задокументованої інформації (задокументованої методики), що пов'язана із системою управління якістю в організації. Також, для більш широкого застосування, у стандарті використовується термін «послуга».

Вимоги стандарту ДСТУ ISO 9001-2009 необхідно адаптувати до специфіки роботи вищого навчального закладу. Аналізуючи структуру ВНЗ та вже розроблених і впроваджених організаційних структур СУЯ, можна зробити висновок, що їх можливо гармонійно поєднувати.

Планування та внесення змін у систему якості здійснюється у відповідності із розробленою організаційною структурою СУЯ. Пропонуємо діючу організаційну структуру СУЯ Херсонського політехнічного коледжу Одеського національного політехнічного університету (ХПТК ОНПУ) (рис. 1).

Необхідно звернути увагу на те, що для постійного контролю за функціонуванням та покращенням СУЯ навчальному закладу необхідно створити нові підрозділи: відділ управління якістю та комісію з внутрішнього аудиту.

Ефективне безпосереднє втілення СУЯ залежить у першу чергу від керівників структурних підрозділів. При цьому важливо, щоб їхня участя у розробленні позиціонувалася не як додаткове навантаження, а як ефективний спосіб виконання їх основної роботи. Адже ключовим елементом діяльності будь-якого керівника повинно бути визначення порядку робіт, що виконуються його підлеглими, контроль дотримання цього порядку, аналіз його ефективності та удосконалення. А саме ці функції можуть бути реалізовані за допомогою розроблення та впровадження документованих процесів СУЯ [3].

Відповідно керівники структурних підрозділів повинні нести персональну відповідальність за:

- розроблення документації СУЯ, що стосується діяльності підрозділу;
- забезпечення виконання документації СУЯ персоналом підрозділу;
- аналіз потреби внесення змін до документації СУЯ [3].



Рисунок 1 – Організаційна структура СУЯ ХПТК ОНПУ

Діяльність УЯ структурних підрозділів координується представником керівництва з якості. Для ефективного виконання ними своїх функцій, бажано надати їм певні додаткові повноваження, в першу чергу щодо права отримання інформації, також доцільно визначити спеціальні методи стимулювання для уповноважених (як матеріальні, так і моральні), запровадити певні дії з підвищення їх статусу у навчальному закладі [3].

Необхідно ще раз підкреслити, що новий стандарт не вимагає узгодження документації зі структурою розділів стандарту, тому ВНЗ, які мають розроблені документи не повинні змінювати їх нумерацію та взагалі структуру всієї документації. Термінологію, якою користується організація теж можна залишити. Основною зміною є необхідність формування ризик-орієнтованого мислення. Будь-яка діяльність пов'язана з ризиком. ВНЗ повинні управляти ризиками за допомогою їх ідентифікації, аналізу і подальшого покращення.

Вимоги щодо планування, аналізування та поліпшування, які були у попередньому виданні стандарту ISO 9001 переросли у поняття ризик-орієнтованого мислення. У новому стандарті встановлені конкретні вимоги до організації щодо розуміння нею свого середовища та визначення ризиків, які стануть основою для подальшого планування.

Вся система управління якістю повинна діяти як запобіжний засіб внутрішнім і зовнішнім чинникам та впливам, на упередження усіх невідповідностей. Тому у стандарті ISO 9001 немає окремого розділу чи

підрозділу щодо запобіжних дій. Поняття запобіжної дії передано через використання ризик-орієнтованого мислення у формулюванні вимог до СУЯ.

ВНЗ можуть розробити більш обширну методологію керування ризиками за ту, що вимагає ДСТУ ISO 9001:2015, завдяки застосуванню інших настанов або стандартів, зокрема ДСТУ ISO 31000:2014 (ISO 31000:2009; IDT) Менеджмент ризиків. Принципи та керівні вказівки.

Для формування свого алгоритму процесу переходу до нового стандарту ДСТУ ISO 9001:2015 “Системи управління якістю. Вимоги (ISO 9001:2015, IDT)” авторська група зробила детальний порівняльний аналіз діючого і нового стандарту серії ISO 9001, визначила зміни та нові вимоги:

1. Терміни та визначення понять стандарту подані за ISO 9000:2015.

2. Введено новий розділ «Середовище організації» (розділ 4).

2.1 Виконуючи вимоги цього розділу організація повинна визначити: зовнішні і внутрішні чинники, які впливають на здатність досягати запланованого результату, проводити їх постійний моніторинг; зацікавлені сторони та їх вимоги; межі та сферу застосовності СУЯ (необхідно розробити задокументовану інформацію (у ДСТУ ISO 9001:2009 був термін «задокументована методика») в якій необхідно описати види послуг із обґрунтуванням щодо будь-якої вимоги цього стандарта, яку організація визначила недоречною до сфери застосування у її СУЯ. Відповідність цьому стандарту, буде доведена тоді, коли всі визначені незастосовні вимоги не впливатимуть на відповідність послуги та підвищення задоволеності замовника.).

3. Розділ 5 «Відповідальність керівництва» (ДСТУ ISO 9001:2009) у новому стандарті доповнений і має назву «Лідерство».

3.1 Даний розділ розширив коло зобов'язань особисто керівника такими вимогами: безпосередня відповідальність за результативність СУЯ; забезпечення інтегрування вимог СУЯ у бізнес-процеси організації (ті види діяльності, які є ключовими для цілей існування організації); сприяння використання процесного підходу та ризик-орієнтованого мислення; забезпечення досягнення результатів СУЯ; задіювання, скерування, заохочення, персоналу для того, щоб він робив внесок у розвиток СУЯ; сприяти поліпшенню; підтримувати інших відповідних керівників для демонстрації їхнього лідерства в їхніх сферах відповідальності.

3.2 У підрозділі «Орієнтація на замовника» додано пункт про ризики та можливості, які можуть вплинути на відповідність продукції, а також на здатність підвищувати задоволеність замовника була визначена та врахована.

3.3 Вимоги стосовно формування політики не змінились, додалися тільки вимоги стосовно інформування про політику у сфері якості та вимоги стосовно задокументованої інформації про неї.

3.4 Основна відмінність у цьому розділі нового стандарту – це відсутність вимоги стосовно представника керівництва. Усі функціональні вимоги представника перенесені на найвище керівництво. Хоча, аналізуючи вимоги підрозділу 5.3 «Функції, обов'язки та повноваження в межах організації», можна зробити висновки, що найвище керівництво повинне розподілити обов'язки та повноваження (і ті, які раніше виконував представник керівництва з якості) для відповідних посад у межах організації, тобто не обмежуватись одним співробітником.

3.5 Прибрали вимогу стосовно критичного аналізування з боку керівництва.

4. У розділ 6 «Планування» доданий підрозділ «Дії стосовно ризиків і можливостей». Вимоги стосовно окремої задокументованої інформації немає, тому можна зробити висновок, що організації необхідно у кожний опис визначеного процесу (задокументовану методику) внести окремим розділом план дій стосовно ризиків, оцінку їх результатів, та способи досягнення поліпшення.

4.1 Розширились вимоги стосовно цілей у сфері якості: планування дій для їх досягнення (що потрібно зробити, які ресурси необхідно, хто буде відповідальним, коли це буде завершено, як оцінювати результати), підтримка в актуальному стані задокументованої інформації щодо них.

4.2 Винесено в окремий підрозділ вимоги стосовно планування змін до СУЯ, описані конкретні обов'язки організації, коли вона планує вносити зміни у СУЯ.

5. Розділ 7 «Підтримання системи управління» увібрал у себе такі розділи чинного стандарту: «Керування ресурсами» та частково «Система управління якістю».

5.1. Новий стандарт вимагає конкретизації стосовно людських ресурсів: організація повинна визначити працівників необхідних для результативного запровадження СУЯ, функціонування та контролювання процесів, а також забезпечити їх наявність.

5.2. Надано роз'яснення стосовно людських і фізичних чинників (соціальних, психологічних, фізичних).

5.3. Додалась вимога стосовно визначення ресурсів для моніторингу та вимірювання і його простежуваність.

5.4. З'явився термін «знання організації», який говорить про те, що вимірюється не компетентність конкретного працівника, а загальні знання колективу, які забезпечуються, поряд із знаннями і вміннями окремих фахівців, знаннями, отриманими з інформаційних ресурсів організації, правильне формуванням робочих груп, команд, учасників проектів та ін.

5.5. Винесено в окремий розділ (п.п. 7.3) вимоги до обізнаності персоналу.

5.6. Конкретизовано вимоги стосовно зовнішнього та внутрішнього інформування (п.п. 7.4).

5.7. Терміни «задокументована методика», «протоколи», «записи» у новій версії стандарту об'єдналися у термін «задокументована інформація», виходячи з цього організація має право самостійно визначати форму документу на підтвердження виконання вимоги стосовно документації. Вимоги стосовно необхідної інформації також конкретизовані (п.п. 7.5).

6. Новий стандарт розширив коло своєї сфери діяльності, розмежувавши терміни продукція та послуги, тому розділ 8 має назву «Виробництво» замість «Виготовлення продукції». У цьому розділі більш конкретно описані вимоги щодо продукції та послуг, їх планування та розробляння.

6.1. Введено новий п.п. 8.4 «Контроль надаваних із зовні процесів, продукції та послуг» де говориться про те, що організація повинна визначити засоби контролю, критерії для оцінювання, вибирання та моніторингу дієвості зовнішніх постачальників, а також зберігати задокументовану інформацію стосовно виконаних робіт.

6.2. Введено нові вимоги до п.п.8.5 «Виготовлення продукції та надання послуг»: діяльність після постачання та контроль змін, які повинна виконувати організація, формування та зберігання задокументованої інформації стосовно цих вимог.

6.3. Також додана вимога зазначена у п.п. 8.6 «Випуск продукції та послуг», для виконання якої організація повинна створити задокументовану інформацію стосовно доказів відповідності критеріям прийняття, простежуваність до особи, що санкціює випуск.

7. Розділ стосовно вимірювання, аналізування та поліпшування зазнав не значних змін за ДСТУ ISO 9001:2015 – це розділ 9, він має назву «Оцінювання дієвості».

8. В окремий розділ внесена вимога щодо поліпшування – розділ 10 «Поліпшування».

Беручи до уваги усі визначені зміни та нові вимоги до системи управління якістю за ДСТУ ISO 9001:2015 розроблено алгоритм процесу переходу до нового стандарту ДСТУ ISO 9001:2015 “Системи управління якістю. Вимоги (ISO 9001:2015, IDT)”.

## **Висновки**

Система якості, яка ефективно функціонує, дозволяє забезпечити докази для споживачів та потенційних споживачів відносно того, що ВНЗ здатний зробити для них, забезпечує стабільний випуск компетентних фахівців, свідомих членів суспільства, забезпечує покращення у структурі управління, підвищує продуктивність, оптимізує витрати, зміцнює імідж і посилює позиції ВНЗ на ринку освітніх послуг.

**Список літератури:** 1. Розвиток системи забезпечення якості вищої освіти в Україні: інформаційно-аналітичний огляд / Укл.: Добко Т., Золотарєва І., Калашинікова С., Ковтунець В., Курбатов С., Линьова І., Луговий В., Прохор І., Раішкевич Ю., Сікорська І., Таланова Ж., Фініков Т., Шаров С.; за заг. ред. С. Калашинікової та В. Лугового. – Київ : ДП «НВЦ «Приоритети», 2015. – 84 с., 2. Підгасець П., Бригілевич І. Система управління якістю як інструмент вдосконалення діяльності органу місцевого самоврядування. Метод.посібник / [Підгасець П., Бригілевич І. – К.]; Швейцарсько-український проект «Підтримка децентралізації в Україні – DESPRO». – К. : ТОВ «Софія-А». – 2012. – 134 с. 3. DSTU ISO 9001:2015 “Системи управління якістю. Вимоги (ISO 9001:2015, IDT)”

**Bibliography (transliterated):** 1. Rozvytok systemy zabezpechennya yakosti vyshchoyi osvity v Ukraini: informatsiino-analitychnyi ohlyad /Ukl.: Dobko T., Zolotaryova I., Kalashnikova S., Kovtunets V., Kurbatov S., Lynova I., Luhovyi V., Prokhor I., Rashkevych Iu., Sikorska I., Talanova Zh., Finikov T., Sharov S.; za zah.red. S. Kalashnikovoia ta V. Luhovoho. – Kyiv : DP «NVTs «Priorytety», 2015. – 84 s. 2. Pidhaiets P., Bryhilevych I. Sistema upravlinnia yakistiu yak instrument vdoskonalennia diialnosti orhanu mistsevoho samovriaduvannia. Metod.posibnyk / [Pidhaiets P., Bryhilevych I. – K.]; Shveitsarsko-ukrainskyi proekt «Pidtrymka detsentralizatsii v Ukraini – DESPRO». – K. : TOV «Sofia-A». – 2012. – 134 s. 3. DSTU ISO 9001:2015 “Systemy upravlinnia yakistiu. Vymohy (ISO 9001:2015, IDT)”

УДК 621.9.02-19; 621.9.06.001.4

В.П. Ларшин, д-р техн. наук, Н.В. Лищенко, канд. техн. наук,  
Одесса, Україна

## МОНІТОРИНГ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА НА СТАНКАХ С ЧПУ

Показано місце нового напряму в технології машинобудування – моніторингу та технологічної діагностики на верстатах з ЧПК, в порівнянні з класичними методами цієї науки: методом пробних проходів та промірів, і методом автоматичного отримання розмірів. Встановлено важливість вбудованих систем моніторингу та технологічної діагностики в забезпеченні високої продуктивності праці за рахунок забезпечення самодостатності, автономності та мобільності верстатів з ЧПК на етапах їх налагодження і функціонування.

**Ключові слова:** моніторинг, технологічна діагностика, теоретико-імовірнісний підхід, параметри стану, технологічна система

Показано место нового направления в технологии машиностроения – мониторинга и технологической диагностики на станках с ЧПУ, в сравнении с классическими методами этой науки: методом пробных проходов и промеров, и методом автоматического получения размеров. Установлена важность встроенных систем мониторинга и технологической диагностики в обеспечении высокой производительности труда за счёт обеспечения самодостаточности, автономности и мобильности станков с ЧПУ на этапах их наладки и функционирования.

**Ключевые слова:** мониторинг, технологическая диагностика, теоретико-вероятностный подход, параметры состояния, технологическая система

*It is shown the place of a new direction in mechanical engineering – monitoring and cutting diagnostics on CNC machines, in comparison with the classical methods of the science: method of test passes and measurements and that with automatically received sizes. It is established the importance of embedded systems for monitoring and cutting diagnostics to ensure high productivity at the expense of self-sufficiency, autonomy and mobility of the CNC machine tools in the stages of their setting up and operation.*

**Keywords:** monitoring, technological diagnostics, probability-theoretic approach, state parameters, manufacturing system

**1. Постановка проблемы.** Появление многофункциональных станков с ЧПУ, типа обрабатывающий центр, позволило резко увеличить производительность технологических операций за счёт обеспечения самодостаточности, автономности и мобильности технологических систем с программным управлением при минимальном участии оператора станка в выполнении всех этапов технологической операции. Автоматизация и программирование всех рабочих движений станка (основных и вспомогательных), включая измерительные процедуры на этапе наладки станка и послеоперационный контроль заготовки при помощи встроенной измерительной системы, осуществляются при едином централизованном

управлении от контроллера ЧПУ (CNC controller). Технологическим преимуществом при этом является измерение и обработка заготовки от одних и тех же технологических баз. За счёт указанной многофункциональности станка появилась также возможность предварительно обработать эти базы на том же самом станке, а затем от них продолжить обработку исполнительных поверхностей заготовки. Встроенные системы мониторинга и технической диагностики позволяют оператору станка судить о нормальной его работе, которая выполняется при закрытой для наблюдения рабочей зоне. Это вызвано не только требованиями техники безопасности, но также, необходимостью подачи под давлением СОЖ в зону резания.

Повышение интенсивности работы мехатронных станков часто приводит к дополнительной потере времени из-за отказов и износа режущего инструмента, особенно это касается шлифовального инструмента на станках с ЧПУ. Определение оптимального момента правки шлифовальных кругов возможно только на основе контроля параметров состояния процесса шлифования и установления связи между ними и выходными параметрами технологической системы (качество и точность деталей). Эта проблема и связанные с ней задачи должны быть решены не только на уровне разработки конкретных устройств, но также принципиально на основе научных подходов и методов технологического анализа.

**2. Анализ последних исследований и публикаций.** Согласно теории автоматизации оборудования с ЧПУ, система мониторинга и диагностики должна иметь полную интеграцию с контроллером ЧПУ, чтобы достичь эффективной автоматизации процесса обработки (рис.).

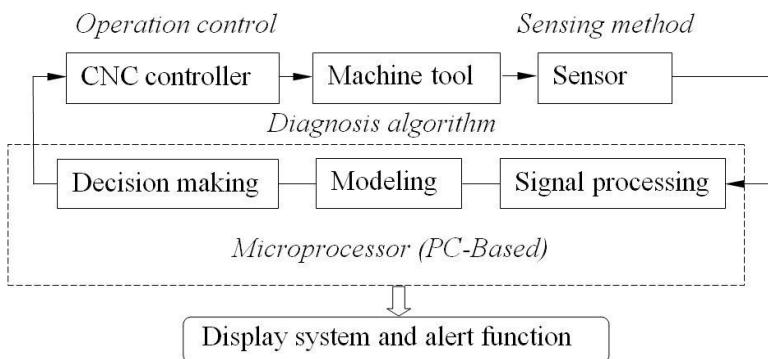


Рисунок – Онлайн мониторинговая система для станка с ЧПУ [1]

Однако, существующие CNC контроллеры являются закрытыми системами по отношению к контролю состояния станочного инструмента. Поэтому дальнейшие исследовательские работы по встроенным системам мониторинга и технологической диагностики актуальны в технологии машиностроения. В технологической системе (manufacturing system) обычно рассматривают четыре главных элемента: режущий инструмент, процесс обработки, заготовку и сам металлорежущий станок [1]. Для эффективного функционирования технологической системы важны все указанные элементы, но прежде всего, следует обратить внимание на режущий инструмент. Его поломка или износ напрямую и существенно отражаются на качестве продукта. Следовательно, решающее значение для автоматизации процесса механической обработки приобретает контроль текущего состояния инструмента и выявление его отказа, который происходит неожиданно (лезвийный инструмент) или постепенно (абразивный инструмент) и отражается катастрофически на заготовке или на дорогостоящем станке с ЧПУ. Успешное выполнение мониторинга состояния инструмента зависит от двух факторов: (1) от качества информации, поступающей от мониторинговых датчиков (monitoring sensors), и (2) от алгоритма диагностики, использованного для анализа данных, снимаемых с этих датчиков (sensory data) для принятия надлежащего решения. В этой связи актуальны исследования по определению типа и числа использованных датчиков, а также по установлению алгоритмов обучения и принятия решения, чтобы связать информацию датчиков (sensory information) с идентификацией состояния технологической системы или процесса обработки (process state). В технике автоматизации появилось направление сенсорной интеграции (sensor fusion), которое основано на получении информации от более, чем одного датчика [1].

Диагностика состояния инструмента это не единственная задача; важное значение имеет информация о результатах обработки деталей на станках с ЧПУ. Например, информация о параметрах качества обработанной поверхности, которые оказывают влияние на эксплуатационные свойства этих деталей [2] или результаты послеоперационного контроля, например, на зубошлифовальном станке с ЧПУ. На качество поверхности оказывают влияние режимы резания, которые могут быть проконтролированы и учтены заранее. Однако многие другие условия резания остаются вне контроля: влияние СОЖ, износ инструмента, свойства обрабатываемого материала, силовой и температурный фактор в зоне резания и т.п. В связи с этим следует отметить исследования, позволяющие прогнозировать результаты обработки на основе информации от встроенных датчиков (sensor fusion) и математических методов цифровой обработки этих сигналов для представления унифицированной информации о состоянии технологической

системы. Для этого используются новые подходы и методы моделирования, которые можно разделить на ряд групп в зависимости от исходных теорий, лежащих в их основе. К числу таких теорий относятся: теория резания и технология машиностроения, теория планирования и проведения экспериментальных исследований, теория искусственного интеллекта [2].

Из сказанного вытекает необходимость установить связь описанных тенденций обеспечения самодостаточности, автономности и мобильности технологических систем с классическими подходами в технологии машиностроения, и дать характеристику новых возникающих при этом направлений и задач, привести примеры решения некоторых из этих задач.

**3. Целью исследования** является технологический анализ современных тенденций в технологии машиностроения, связанных с обеспечением самодостаточной, автономной и мобильной работы станков с ЧПУ в гибком автоматизированном производстве.

**4. Материалы исследований.** В соответствии с теорией технических систем имеются два вида этих систем: системы – конструкции и системы – процессы. Причем, взаимодействие этих систем таково, что системы – конструкции предназначены для реализации систем – процессов. К числу наук о процессах, обеспечивающих требуемый технологический результат (количество и качество продукции, сроки изготовления при наименьшей трудоёмкости и себестоимости), относится технология машиностроения. По определению проф. Маталина А.А. технология машиностроения – это наука об изготовлении машин требуемого качества в установленном производственной программе количестве и в заданные сроки при наименьших затратах живого и овеществлённого труда, т.е. при наименьшей себестоимости [3]. По сути, этим определением сформулирована задача оптимизации технологических процессов и систем. Объектом технологии машиностроения являются технологические процессы изготовления машиностроительной продукции и прежде всего процессы и операции обработки и сборки. Частью этих процессов является собственно процесс взаимодействия элементов технологической системы, который определяет затраты основного (машинного) времени.

Технологический анализ, как метод научного исследования в технологии машиностроения, обычно выполняют на этапах производства и его подготовки (технологическая подготовка производства), которые являются этапами жизненного цикла изделия. На обоих этих этапах используется математический аппарат теории оптимизации, которая является, соответственно, методом управления по отношению к выполняемому процессу (этап производства) и методом проектирования этого процесса (этап подготовки производства). При необходимости проверить и уточнить

результаты технологического проектирования оптимизацию используют также как метод планирования эксперимента. Здесь следует отметить, что в зарубежной литературе вместо термина «планирование эксперимента» используют термин «проектирование эксперимента» (experiment design). В этом смысле оптимизация является не только методом проектирования технологических процессов и систем, но также методом проектирования экспериментальных исследований, которые являются неотъемлемой частью технологии машиностроения.

Как правило, технологический анализ основан на элементах инженерной физики (теплофизика и динамика), которые иногда называют технологическими. Эти направления соответствуют природе явлений, происходящих при механической обработке (температурный и силовой фактор), и являются научной основой обеспечения эксплуатационных характеристик изделий машиностроения. В свою очередь технологии машиностроения как науке о процессах соответствуют два общенаучных подхода: теоретико-вероятностный [4] и частотный [5]. В соответствии с теоретико-вероятностным подходом, который можно назвать технологической статистикой, любой параметр процесса может быть систематической (детерминированной), случайной или композиционной (смешанной) величиной. Поскольку параметры реального процесса редко могут быть детерминированными, то в этом смысле детерминированная величина может описывать некий абстрактный, виртуальный, реально не существующий процесс. Выводы, которые можно извлечь из моделирования детерминированного процесса могут оказаться полезными для практики, если они касаются каких-либо установленных тенденций. Случайная величина также может иметь место в технологическом анализе, например, при оценке и моделировании припуска на обработку, шероховатости обработанной поверхности, при анализе вибраций в упругой системе металлорежущего станка. Имеется соответствующий математический аппарат теории случайных процессов, который используют для принятия технологических решений. В этом случае рассматриваемые технологические параметры, например, припуск на обработку или параметры шероховатости являются статистическими, т.е. не детерминированными. Следовательно, они определяются законами распределения случайной величины, например, законами распределения Гаусса, Стьюдента и т.п.

Как правило, в исследованиях технологических параметров, их рассматривают как параметры, состоящие из двух составляющих: систематической (детерминированной) составляющей и случайной. Основные технологические закономерности проявляются в изменении детерминированной составляющей (например, при многофакторном планировании эксперимента), а случайная составляющая является при этом

«шумовой» и характеризует надежность оценки устанавливаемой закономерности. По этой причине теоретико-вероятностный подход по своей сути и математическому аппарату соответствует реальным технологическим процессам, в том числе на настроенных станках и станках с ЧПУ.

Соответствие частотного подхода природе параметров технологических процессов механической обработки, т.е. изменению технологических параметров во времени, следует из принципиальной сущности интегрального преобразования Фурье, предназначенного для трансформации временных параметров процесса в частотные параметры (прямое преобразование Фурье) и обратно из частотных параметров во временные параметры (обратное преобразование Фурье). Частотное представление технологических параметров позволяет принимать эффективные технологические решения путем внесения соответствующих корректив в передаточные функции технологической системы. Например, коррективы в режимы резания могут быть внесены для обеспечения устойчивой работы технологической системы, т.е. для вывода её из неустойчивого состояния. Другим примером эффективности частотного подхода является разделение спектра неровностей обработанной поверхности на частотные составляющие, которые соответствуют категориям шероховатости, волнистости и отклонениям формы профиля. Этую математическую операцию производят с помощью цифровых фильтров, в том числе фазокорректирующих, или на основе цифровой операции сглаживания сигнала, характеризующего профиль обработанной поверхности [6].

Положительным качеством рассматриваемой методологии двух подходов (теоретико-вероятностного и частотного) является естественное взаимодействие этих подходов, поскольку результаты теоретико-вероятностного моделирования (математического описания) технологических параметров и результаты их экспериментального измерения могут быть подвергнуты частотному преобразованию Фурье. При этом возможны следующие случаи: систематическая составляющая сигнала превалирует над случайной составляющей сигнала или не превалирует. В первом случае, говорят, например, о периодическом сигнале. В противном случае (случайная составляющая сигнала больше систематической составляющей) говорят об апериодическом сигнале. Количество соотношение между систематической и случайной составляющими выявляют с помощью автокорреляционной функции исходного сигнала [7].

Практика технологических исследований подтверждает правомерность представления сигнала технологического назначения в виде суммы систематической (периодической, полигармонической) и случайной (апериодической) составляющих. Например, по этому принципу построены европейские (ISO) или американские (ASME) стандарты по шероховатости,

волнистости и отклонению формы поверхности. Такой принцип позволяет, например, установить взаимосвязь между периодическими сигналами вибраций и волнистостью обработанной поверхности.

Для временных сигналов с превалирующей систематической составляющей их частотное представление по Фурье имеет вид дискретного спектра, т.е. каждой явно выраженной амплитуде гармоники соответствует определенная частота. Поэтому, обратное преобразование Фурье может быть выполнено путём суперпозиции соответствующих явно выраженных и дискретных гармонических составляющих. Амплитуду этих составляющих берут из амплитудно-частотной характеристики сигнала, а фазу – из его фазочастотной характеристики.

Особенностью технологических исследований является ограниченный временной интервал наблюдения сигнала, характеризующего технологический параметр. Например, запись вибраций в упругой системе металлорежущего станка производят на дискретных, ограниченных по времени интервалах времени длительностью 0,2 секунды при частоте дискретизации исходного временного сигнала 50 кГц. Этот незначительный по длительности временной интервал (0,2 с) преобразуют в соответствующий спектр сигнала и наблюдают за изменением частотных параметров сигнала во времени. При этом текущее время складывается из суммы интервалов длительностью 0,2 с. При измерении припуска на отдельных впадинах зубчатого колеса весь интервал изменения припуска характеризуется длиной измерительной окружности  $2\pi R$ , где  $R$  – радиус измерительной окружности заготовки. Ещё одним примером ограниченности сигнала может быть ограниченность длины трассирования при измерении щупом параметров профиля поверхности. Указанная ограниченность временного интервала наблюдения процесса приводит к нескольким сложностям применения указанных методологических подходов. Во-первых, представление любой временной периодической функции в виде дискретного спектра, т.е. в виде ряда Фурье, возможно, если указанная функция существует в бесконечном по длительности интервале времени. Всякое ограничение этого интервала (по времени или координате) нарушает требование бесконечности наблюдаемого процесса (периодического или апериодического). Это приводит к невозможности гармонического представления сигнала в виде ряда Фурье (или дискретного частотного спектра). В этом случае преобразование Фурье выражается интегралом Фурье. Оно даёт непрерывный спектр в функции частоты изменения сигнала. Аналогом дискретной амплитуды сигнала в спектре является спектральная плотность сигнала. Во-вторых, при ограниченном (по времени или координате) сигнале этот сигнал часто содержит некую постоянную составляющую, имеющую ту же самую ограниченную протяжённость по времени или координате. Из

свойства линейности преобразования Фурье, следует, что выходной частотный спектр будет содержать спектральную часть от одиночного прямоугольного импульса, длина которого равна указанному отрезку времени или координаты. Спектр этого сигнала является непрерывным и описывается функцией  $\text{sinc}(x)$ . Этот спектр может превалировать над спектром переменной части сигнала, что сведет на нет результаты частотного анализа сигнала. В-третьих, задачей является выбор частоты дискретизации исходного сигнала, исходя из требуемого диапазона частот этого сигнала в его частотном представлении.

Для выявления новой тенденции в технологии машиностроения как науки о процессах (проектирование процесса, управление ходом процесса в технологической системе, оптимизация процесса) рассмотрим элементы новой методологии. Технологическая операция является законченной частью технологического процесса. Таким образом, предыдущие операции задают ей начальные условия через исходное состояние предмета труда – заготовки. Поэтому операция как процесс во времени имеет вход, текущее состояние и выход. Причем вход операции имеет двойственное содержание. Во-первых, это исходное состояние заготовки, которая поступила на эту операцию. В исходном состоянии заготовки отражены все предыдущие операции и условия, в которых они были проведены. Во-вторых, входом в операционный процесс являются заданные режимы обработки, которые определяются на этапе подготовки производства, исходя из нормального протекания всех операций. Нормальное – это означает, что рассматриваются математическое ожидание всех параметров заготовки (размеров, твердости) и заданные отклонения от этого математического ожидания, которые в технологии машиностроения характеризуют соответствующими допусками. Таким образом, допуски на геометрические параметры заготовки характеризуют случайную (неконтролируемую) составляющую этих параметров. Очевидно, что это следствие неконтролируемых параметров соответствующих процессов обработки (контролируемых и неконтролируемых), включая внешние условия их выполнения. В этих параметрах процессов также есть доля случайной составляющей. Таким образом, параметры заготовки рассматривают как статистические, а не детерминированные величины. Отклонения от математического ожидания параметров (допуск) в конструкции заготовки вызвано соответствующими отклонениями параметров процессов её обработки. Поэтому технология машиностроения как наука о процессах строится по принципу регламентирования как получаемого параметра (например, размера), так и отклонения от него. Такой подход находит отражение в регламентации промежуточных (операционных) размеров и допусков на них. Для согласования последовательности операций имеется соответствующая система учёта размеров и допусков на них, которая

называется размерный анализ. Эта система учета является избыточной с точки зрения величин допусков на размеры, поскольку чаще всего построена по принципу полной взаимозаменяемости. Это означает, что рассматриваются случаи, когда сумма уменьшающих звеньев размерной цепи является минимальной, а сумма увеличивающих звеньев размерной цепи является максимальной. Причем известно, что вероятности этих событий ничтожно малы. Следовательно, наиболее вероятное событие заключается в том, что сумма уменьшающих составляющих размерной цепи не будет минимальной, также как и сумма увеличивающих элементов размерной цепи не будет максимальной. Для обоих указанных случаев указанные суммы будут наиболее вероятными, что применительно к размерам заготовки означает их наиболее вероятное значение при распределении этих размеров по нормальному закону. Этот факт теоретически утверждается центральной предельной теоремой (Central Limit Theorem), которая является базовым понятием в теории вероятности, поскольку расширяет область действия нормального закона распределения случайных величин. Центральная предельная теорема имеет несколько вариантов, названных именами соответствующих авторов. Например, в соответствии с вариантом этой теоремы, разработанным А.М. Ляпуновым (Lyapunov CLT) среднее достаточно большой выборки независимых одинаково (или неодинаково) распределенных случайных величин будет приблизительно нормально распределенным.

Естественно, что без дополнительной информации о процессе, которая появляется по результатам соответствующего контроля и диагностики этого процесса, технологии вынуждены создавать избыточность по припуску и по допуску на промежуточные размеры заготовки. Поэтому без получения дополнительной информации о процессе, технологии обработки на настроенных станках в принципе являются трудоёмкими, т.к. связаны с удалением завышенных припусков, которые в свою очередь складываются из завышенных допусков на промежуточные размеры. Это следует из алгоритма размерного анализа, в соответствии с которым определяют размеры исходной заготовки с учётом её промежуточных размеров. Альтернативный метод – метод пробных проходов и промеров отличается от описанного выше отсутствием избыточности, но требует индивидуального подхода на каждом рабочем месте по ходу технологического процесса. И в этом смысле по затратам времени и денежным затратам этот метод тоже является трудоёмким, поскольку он основан на интеллекте рабочих-операторов и многолетнем их опыте поиска решений для большого количества возникающих индивидуальных состояний процесса обработки. Поэтому в последнее время развивается новое направление в технологии, основанное на использовании преимуществ каждого из указанных выше

методов обеспечения точности обработки. Это направление связано с мониторингом и диагностикой технологических систем (процессов и операций), которое в свою очередь содержит ряд новых идей: многосенсорность (sensor fusion), диагностика состояния инструмента, статистическая обработка сигналов о процессе для выделения полезной информации из зашумленных сигналов, цифровая обработка сигналов (фильтрация, сглаживание, предсказание тренда и т.п.). Некоторые из этих направлений развиваются самостоятельно: статистический контроль качества (Statistical Quality Control), теория оценивания (включает сглаживание, фильтрацию и предсказание сигналов о процессе на основе их цифровой обработки).

Новое направление в технологии машиностроения основано на кибернетическом подходе к понятию «система» (в данном случае технологическая система), которое характеризуется входом, состоянием и выходом. Выше было сказано, что состояние процесса статистически отражается на состоянии заготовки (косвенная оценка параметров конструкции заготовки через параметры процесса её изготовления). Кроме того, возможно, получение прямой информации о величине конструктивных параметров заготовки при наличии в технологической системе прямого измерения и контроля (измерение припуска, эвольвенты, линии зуба, погрешности шага и т.п. на зубошлифовальном станке с ЧПУ HÖFLER RAPID 1250). Например, промежуточные результаты измерения параметров зубчатого колеса после зубошлифования показали, что эти параметры не соответствуют чертежу. При этом имеется припуск на обработку. В этом случае в системе ЧПУ станка появляется рекомендация продолжить обработку. Здесь проявляется аналогия с методом пробных проходов и промеров. В этой связи указанное новое направление в технологии машиностроения является развитием теории оптимизации технических систем. Одновременно, это направление в кибернетике, которая включила в свой состав всю теорию систем линейных и нелинейных, теорию автоматического управления, теорию адаптивных и интеллектуальных систем, теорию идентификации и диагностики систем, теорию оптимизации как метода проектирования и управления.

Как отмечалось, статистическое управление качеством выделилось в отдельное направление, часто не связанное с технологией машиностроения. Для обеспечения качества выпускаемого продукта существует два метода: 1) контроль продукта (т.е. результата), 2) контроль процесса получения продукта. Известно, что контроль продукта – это дорогостоящее мероприятие из-за отсутствия прецизионных измерительных средств, в том числе датчиков информации. В тоже время контроль процесса часто является достаточным, например, в технологии изготовления материалов. Установить состав

материала часто невозможно (очень дорогостоящее мероприятие). В то же время проконтролировать долю каждого компонента в материале сравнительно легко во время осуществления процесса изготовления этого материала (контроль процесса). Сказанное не относится напрямую к технологии обработки материалов, т. к. контролируемые параметры, указанные в чертеже детали, часто невозможно получить методом прямых измерений в процессе изготовления (контроль процесса). Имеются исключения, когда средства измерения параметров заготовки непосредственно встроены в технологическую систему и управляются из единого центра программного управления (CNC контроллер). В данном случае CNC контроллер станка с ЧПУ является единым центром «слияния» всех информационных потоков на станке, которые несут информацию о контролируемых параметрах технологической системы. Под контролируемыми параметрами понимают такие сигналы, которые являются детерминированными и содержат минимальную случайную составляющую. Например, сигналы о параметрах режимов резания. В то же время для контроля процесса в режиме мониторинга и диагностики многие контролируемые параметры являются статистическими, т.е. содержат две составляющие: детерминированную (систематическую) и случайную (подчиняется какому-либо закону распределения). Статистическая природа параметра означает его неоднозначность и, следовательно, требуются отдельные математические процедуры идентификации параметра, т.е. выделение его детерминированной части за счет подавления случайной составляющей. Эти процедуры в последнее время сформировались как отдельное научное направление в технологической статистике – цифровая обработка сигналов, которая включает теории сглаживания, фильтрации и предсказания. Они являются частью более общей статистической теории оценивания. Основами этой теории являются принятые в технологическом анализе подходы: теоретико-вероятностный и частотный. Следствием этих подходов являются известные концепции статистического анализа: дисперсионный анализ (в зарубежной литературе ANOVA – ANalysis Of VAriance), планирование экспериментов (DOE – Design Of Experiments), минимум среднеквадратической ошибки (minimum-mean-square-error), максимального правдоподобия (maximum likelihood estimation), и другие статистические методы оценивания параметров (estimation methods in statistics). Все эти методы, как и указанная выше центральная предельная теорема в статистике, основаны на таких основных параметрах выборки данных, как математическое ожидание (expected value) и дисперсия (variance), которая характеризует отклонение от математического ожидания параметра. Но само математическое ожидание не является корректным, т.к. найдено по недостаточному числу измерений, поэтому отклонение от фактического

среднего значения зависит от числа измерений по Стьюенту (t-test). Здесь следует отметить, что t-test Стьюента является частным случаем дисперсионного анализа (ANOVA), разработанного Р. Фишером.

Подводя итог статистическим методам оценивания параметров процессов, следует отметить, что большая их часть основана на решении задачи оптимизации в статистике, исходя из экстремального значения какого-либо критерия оценивания. В этом смысле оптимизация является не только методом проектирования технологической операции (process design) на этапе подготовки производства, но также распространяется на обработку сигналов системы мониторинга и диагностики операции в режиме реального времени.

## 5. Выводы и перспективы развития

1. Показано место нового направления в технологии машиностроения – мониторинга и технологической диагностики на станках с ЧПУ, в сравнении с классическими методами этой науки – методом пробных проходов и методом автоматического получения размеров. Установлена важность встроенных систем мониторинга и технологической диагностики в обеспечении высокой производительности труда за счёт обеспечения самодостаточности, автономности и мобильности работы станков с ЧПУ.

2. Предложены общенаучные подходы в технологическом анализе – теоретико-вероятностный и частотный, расширяющие возможности известных технологических концепций: теплофизики, динамики и статистики.

3. Показано место теории оптимизации в анализе и синтезе технологических процессов и систем на этапах производства, его подготовки и при экспериментальных исследованиях: оптимизация как метод проектирования технологических операций, планирования экспериментов и управления состоянием технологических систем.

**Список использованных источников:** 1. Lou Kang-Ning. An Intelligent Sensor Fusion System for Tool Monitoring on a Machining Centre / Kang-Ning Lou, Chen-Jen Lin // Advance Manufacturing Technology. – 1997, Volume 13, Issue 8, P.556-565. 2. Morales-Menendez Ruben. Sensor-Fusion System for Monitoring a CNC-Milling Center / Ruben Morales-Menendez, Sheyla Aguilar M, Ciro A. Rodriguez, and others // Advances in Artificial Intelligence. Lecture Notes in Computer Science. – Volume 3789, 2005. – P.1164-1174. 3. Маталин А.А. Технология машиностроения: Учебник для машиностроительных вузов по специальности «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты». – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1985. – 496 с. 4. Хусу А.П. Шероховатость поверхностей (теоретико-вероятностный подход) / А.П. Хусу, Ю.Р. Витенберг, В.А. Пальмов. – М.: Гл. ред. физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1975. – 344 с. 5. Хемминг Р.В. Цифровые фильтры: Пер. с англ. / Под ред. А.М. Трахтмана. – М.: Сов. Радио, 1980. – 224 с. 6. Лищенко Н.В. Частотные характеристики профилограммы поверхности и вибраций при её обработке / Н.В. Лищенко // Високі технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. – Харків, НТУ "ХПІ", 2015. – Вип. 1(25). – С.94-108. 7. Лоповок Т.С. Волнистость поверхности и её измерение / Т.С. Лоповок. – М.: Изд-во стандартов, 1973. – 184 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. *Lou Kang-Ning.* An Intelligent Sensor Fusion System for Tool Monitoring on a Machining Centre / **Kang-Ning Lou, Chen-Jen Lin** // Advance Manufacturing Technology. – 1997, Volume 13, Issue 8, P.556-565. 2. *Morales-Menendez Ruben.* Sensor-Fusion System for Monitoring a CNC-Milling Center / **Ruben Morales-Menendez, Sheyla Aguilar M, Ciro A. Rodriguez, and others** // Advances in Artificial Intelligence. Lecture Notes in Computer Science. – Volume 3789, 2005. – P.1164-1174. 3. *Matalin A.A.* Tekhnologiya mashinostroeniya: Uchebnik dlya mashinostroyel'nykh vuzov po spetsial'nosti «Tekhnologiya mashinostroeniya, metallorezhushchie stanki i instrumenty». – L.: Mashinostroenie, Leningr. otd-nie, 1985. – 496 s. 4. *Khusu A.P.* Sherokhovatost' poverkhnostey (teoretiko-veroyatnostnyy podkhod) / **A.P. Khusu, Yu.R. Vitenberg, V.A. Pal'mov.** –M.: Gl. red. fiziko-matematicheskoy literatury izd-va «Nauka», 1975. – 344 s. 5. *Khemming R.V.* Tsifrovye fil'try: Per. s angl./ Pod red. A.M. Trakhtmana. – M.: Sov. Radio, 1980. – 224 s. 6. *Lishchenko N.V.* Chastotnye kharakteristiki profilogrammy poverkhnosti i vibratsiy pri ee obrabotke / **N.V. Lishchenko** // Visoki tekhnologii v mashinobuduvanni: zb. nauk. prats'. – Kharkiv, NTU "KhPI", 2015. – Vip. 1(25). – S.94-108. 7. *Lopovok T.S.* Volnistost' poverkhnosti i ee izmerenie / **T.S. Lopovok.** – M.: Izd-vo standartov, 1973. –184 s.

УДК 621.923–5

В.Г. Лебедев, д-р техн. наук, Е.А. Луговская, канд. техн. наук,  
А.В. Овчаренко, Одесса, Украина

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ШЛИФОВАНИЯ МАРТЕНСИТИНО-СТАРЕЮЩЕЙ СТАЛИ, Н18К9М5Т

*Предметом исследования является процесс шлифования мартенситно-стареющей стали, а именно Н18К9М5Т. Объектом исследования – величина углубления зерен шлифовального круга из КБН в металл, объем удаляемого металла, удельная мощность, производительность процесса шлифования и удельный износ шлифовального круга.*

**Ключевые слова:** КНБ, Н18К9М5Т, углубление зерен, производительность процесса шлифования, износ

*Предметом дослідження є процес шліфування мартенситно-старіючої сталі, а саме Н18К9М5Т. Об'єктом дослідження - величина поглиблення зерен шліфувального круга з КБН в метал, обсяг видаленого металу, питома потужність, продуктивність процесу шліфування і питома зношування шліфувального круга.*

**Ключові слова:** КНБ, Н18К9М5Т, поглиблення зерен, продуктивність процесу шліфування, зношування

*The subject of the study is the process of grinding martensitic-aging steel, namely H18K9M5T. The object of the study is the value of the deepening of the grinding wheel grains from KBN into metal, the volume of the metal being removed, the specific power, the grinding process and the specific wear of the grinding wheel.*

**Keywords:** KNB, N18K9M5T, deepening of grains, productivity of grinding process, wear

### Вступление

Мартенситно-стареющие стали – это высокопрочные стали с малым содержанием углерода ( $C < 0,03\%$ ). Вместо углерода в этих сталях используется никель или хром, дополнительно легируется кобальтом, молибденом и т.д. Эти элементы обуславливают дисперсионное твердение мартенситной, Fe – Ni (или Fe – Cr – Ni), матрицы при старении.

Несмотря на свои положительные качества сталь довольно мало распространена в машиностроении, так как одним из главных недостатком является отсутствие нормативных материалов (баз) обеспечивающих качество поверхностного слоя. В случае превышения температурного режима интерметалидные частички растворяется в механической смеси, что ведет к значительной потери качества стали.

### Изложение основного материала

#### 1. Средняя величина углубления зерен из КНБ в металл

Средняя величина проникновения режущего зерна в металл, является фактором определяющий степень силовой нагрузки на зерно. А от этого

зависят такие параметры как сечение стружки и шероховатость поверхности. Теоретических расчетов по определению данного параметра для такого типа кругов нет, а полученные практические результаты нуждаются в уточнении. Так как единственными основными показателями являются характеристики шлифовального круга и режими обработки.

Увеличение скорости вращения детали увеличивает рост внедрения зерна в металл, при этом силы резания значительно возрастают.

С увеличением глубины резания и поперечной подачи, как и скорость вращения детали, увеличивает показатель углубления зерна в металл. Однако при увеличения скорости вращения шлифовального круга показатели сил уменьшаются. Данный феномен, связанный с тем, что на один и тот же припуск, участвующих зерен в обработке металл значительно больше чем при малых оборотах шлифовального круга.

Математическая обработка данных измерений позволила получить зависимость углубления зерна в металл в виде:

$$h = \frac{37.569 v_d^{0.68} t^{0.46} s^{0.12} r^{0.57}}{v_{kp}^{0.16}} \quad (1)$$

где  $v_d$  – скорость вращение детали, м/с;  $t$  – глубина резания, мм;

$s$  – поперечная подача, мм/ход стола;  $v_{kp}$  – скорость вращения шлифовального круга, м/с;  $r$  – радиус закругления зерна, мкм.

Проведенный исследования показали, что в диапазоне варьируемых режимов величина углубления зерен в металл находится в пределах от десятых долей до 5...6 мкм. Исследование выявило также некоторую незначительную зависимость величины углубления зерна в металл от свойств шлифуемого материала. Это обстоятельство можно объяснить тем, что при обработке различных материалов силы резания отличаются незначительно, например, для закаленной стали  $C_p = 1,56 \cdot 10^6$ ; для незакаленной стали  $C_p = 1,48 \cdot 10^6$ , т.е. отличаются на 10...12% [1, 2, 5]. Это обстоятельство установлено также и в настоящей работе.

Исследования показали, что имеется тенденция к повышению средней величины углубления зерна КНБ в металл при шлифовании таких теплостойких материалов, как сталь 18ХН10Т и мартенситно-стареющая сталь Н18К9М5Т. При шлифовании их величина углубления на 10...15% выше, чем при шлифовании обычных конструкционных сталей.

## 2. Объем металла, удаляемый зерном из КНБ

Объем металла, удаляемый каждым работающим зерном круга, оказывает большое влияние на производительность обработки.

До настоящего времени определение этой величины для зерна работающего круга приведено не совсем точно, так как наиболее достоверные эксперименты заключались во взвешивании удаляемых микростружек. В этих исследованиях точность снижало то обстоятельство, что горячая микростружка после отделения от металла частично сгорала и частично окислялась.

Определение объема металла по следам, оставленным зернами из КНБ на поверхности металла также нельзя признать точным, так как при снятии микростружек образуются навалы, и следы от зерен накладываются друг на друга.

В работе определялась средняя величина углубления зерна в металле, радиус закругления зерен непосредственно в работающем круге, длина пути контакта круга с деталью и удаляемый объем металла зерном.

Средняя величина объема металла, удаляемого каждым зерном КНБ в работающем круге, рассчитывалась по формуле:

$$V = 2\pi \cdot r \cdot h \cdot L , \quad (2)$$

где,  $h$  – углубления зерна в металл, мкм;  
 $L$  – длина пути зерна в металле, мм.

Проведенное исследование позволило установить, что средний объем металла, удаляемый зерном круга из КНБ, зависит от режимов обработки и характеристик круга и может быть представлен в следующем виде:

$$V = \frac{0.47 v_{\partial}^{0.68} t^{0.96} s^{0.12} r^{1.57}}{v_{kp}^{0.16}} . \quad (3)$$

При увеличении глубины резания и скорости детали происходит значительное увеличение объема металла, удаляемого зерном. Происходит это потому, что увеличение этих факторов приводит к возрастанию площади контакта зерна с металлом.

Влияние поперечной подачи незначительно ввиду того, что она оказывает малое влияние на среднюю величину углубления зерна в металл, и, следовательно, на площадь контакта зерна с металлом.

Увеличение скорости вращения шлифовального круга приводит к уменьшению объема металла, удаляемого зерном, что объясняется уменьшением сечения стружки.

В результате проведенных исследований получены зависимости объема удаляемого зерном металла от режимов обработки и характеристик кругов, представленные на рис. 2.

Как видно, наибольшее влияние оказывает зернистость радиуса закругления КНБ зерна. Это связано с тем, что при увеличении радиуса закругления резко возрастает площадь контакта зерна с металлом.

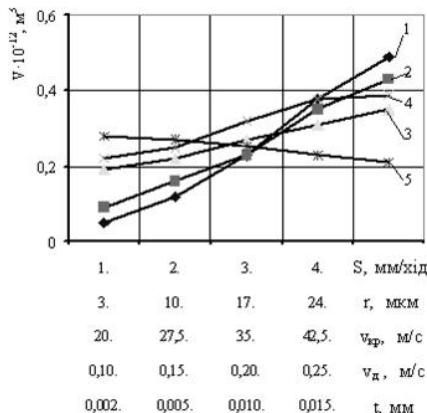


Рисунок 1 – Зависимость величины углубления зерна в металл от режимов обработки:  
1 —  $h = f(r)$ ; 2 —  $h = f(t)$ ; 3 —  $h = f(v_{kp})$ ; 4 —  $h = f(s)$ ; 5 —  $h = f(v_d)$

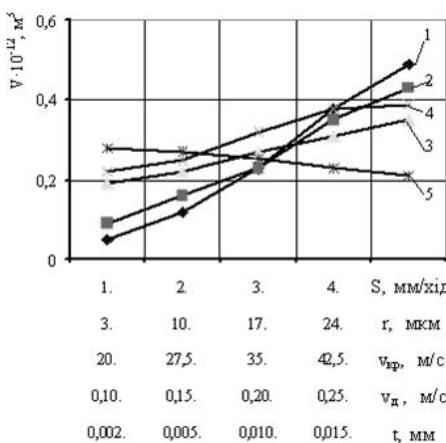


Рисунок 2 – Зависимость объема металла, удаляемого зерном из КНБ круга C1K:  
1 —  $V = f(r)$ , 2 —  $V = f(t)$ ; 3 —  $V = f(v_{kp})$ ; 4 —  $V = f(v_d)$ ; 5 —  $V = f(s)$

### 3. Удельная мощность резания

Мощность резания, затрачиваемая на единицу объема удаляемого металла, представляет собой показатель, связывающий энергетику процесса шлифования с производительностью. Определения данного показателя определялось двумя способами:

1. Суммарная мощность резания к объему удаленного металла за один проход.
2. Отношения мощности резания затрачиваемой зерном на удаления собственного объема стружки.

Незначительное расхождение между полученными данными этих двух способов, дают возможность заключить, что мощность также в значительной степени зависит от режимов обработки и свойств шлифовального круга.

По результатам проведенного исследования можно выразить определения мощности в виде следующей формулы:

$$N = \frac{0.557 v_{kp}^{0.91} \cdot \sigma^{0.75}}{v_0^{0.67} t^{1.13} s^{0.14} r^{1.43} \varepsilon^{1.16}}. \quad (4)$$

где  $\sigma$  – прочность круга, МПа;  $\varepsilon$  – коэффициент тепловой активности, дж/(м<sup>2</sup>0°C с<sup>0.5</sup>).

Как видно из приведенной зависимости, наибольшее влияние на удельную мощность оказывает зернистость шлифовального круга, скорость вращения круга и глубина резания.

При увеличении зернистости круга увеличивается объем металла, причем в большей степени, чем возрастает мощность резания [6]. При увеличении скорости вращения круга мощность резания растет в большей степени, чем величина объема удаляемого металла, что приводит к увеличению удельной мощности.

При увеличении глубины резания величина объема удаляемого металла растет в большей степени, чем мощность, что и приводит к снижению удельной мощности. Такое же явление наблюдается при увеличении скорости детали и поперечной подачи (рис. 3).

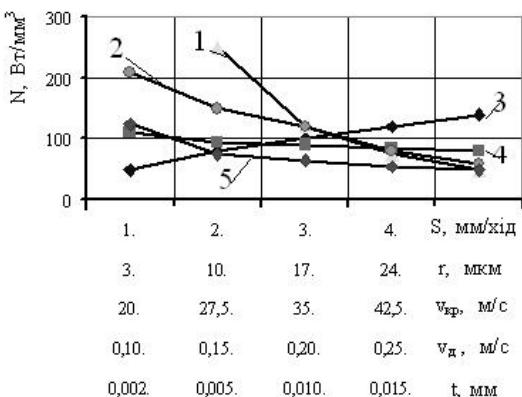


Рисунок 3 – Залежність уделньої потужності від факторів обробки:  
 $1 - N = f(r); 2 - N = f(t); 3 - N = f(v_{kp}); 4 - N = f(v_d); 5 - N = f(s)$

#### 4. Производительность процесса шлифования

Производительность при шлифовании кругами из КНБ измеряется объемом металла, удаляемого в секунду. Эта величина в определенной степени характеризует режущую способность шлифовального круга. Как показали исследования, данная величина зависит от режимов обработки и характеристик кругов. Увеличение таких режимов обработки как скорости детали, поперечной подачи, глубины резания и скорости вращения шлифовального круга, способствует увеличению производительности. Это объясняется тем, что при увеличении параметров  $t$  и  $s$  происходит рост площади пятна контакта круга с деталью, в результате чего в съеме металла принимает участие большее число зерен.

При увеличении же скорости вращения круга через зону контакта его с деталью проходит большее число зерен в единицу времени. Увеличение скорости детали приводит к возрастанию сечения стружки, снимаемой зерном, что и обеспечивает рост производительности обработки. Так, производительность при шлифовании кругами на керамической связке оказалась на 10...15% выше производительности кругов на бакелитовой связке.

Сравнение производительности кругов из КНБ и абразива показывает, что КНБ круги обеспечивают рост производительности обработки на 30...35 %, что объясняется высокими режущими свойствами КНБ зерен.

Исследование производительности на различных материалах показало, что при шлифовании закаленных сталей У8, стали 45, цементированной и закаленной стали 12Х2Н3А производительность практически одинакова.

Производительность при шлифовании стали H18K9M5Т на 15...25 % ниже. Это связано с различной степенью затуплением зерен из КНБ при шлифовании этих материалов.

Зависимость производительности шлифования кругами из КНБ от факторов обработки показана на рис. 4.

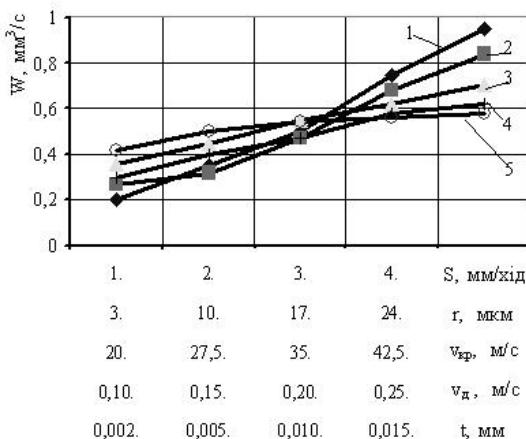


Рисунок 4 – Зависимость производительности шлифования кругами из КНБ от факторов обработки:

1 –  $W = f(r)$ , 2 –  $W = f(t)$ , 3 –  $W = f(v_d)$ , 4 –  $W = f(v_{kp})$ , 5 –  $W = f(S)$

##### 5. Удельный износ шлифовального круга

Удельный износ кругов из КНБ, измеряемый в мг израсходованного КНБ на один грамм снятого металла, связывает расход КНБ с производительностью обработки.

Исследования, проведенные в работе, показали, что в зависимости от факторов обработки эта величина может изменяться от 0,186 до 1,36 мг/г.

Увеличение таких параметров процесса, как  $v_{kp}$ ,  $v_d$ ,  $t$ ,  $s$  приводит к росту удельного износа, ввиду того, что в этих случаях возрастает температурно–силовая нагрузка на зерна КНБ. Уменьшение удельного износа при росте зернистости кругов из КНБ может быть объяснено снижением напряженности процесса резания, как это указывалось.

Рост скорости круга приводит к уменьшению удельного износа ввиду уменьшения сечения стружки, снимаемой КНБ зернами. Значительное влияние на удельный износ оказывают свойства шлифуемого металла. Так, если удельный износ при шлифовании стали 12Х2Н3А принять за 1, то износ для

стали 45 выражается величиной 1,43, а износ при шлифовании мартенситно-стареющей стали H18K9M5T и стали 08Х18Н9Т выражается соответственно величинами 2,7 и 1,28.

Исследования показали, что износ круга происходит в основном за счет вырыва зерен из связки при их затуплении.

Данное обстоятельство подтверждается исследованиями рабочей поверхности круга на микроскопе и термоэлектрическими экспериментами (рис. 5 и рис. 6).

Установлено, что по мере шлифования в поверхность круга внедряются частицы шлифуемого металла, что хорошо видно на фотографиях рабочей поверхности круга (рис. 6) после 100 проходов.

Это приводит к увеличению нагрузок, действующих на зерна, что приводит к их затуплению, а следовательно, к дальнейшему увеличению нагрузки.

При термоэлектрических исследованиях видно, что по мере работы круга импульсы мгновенной температуры увеличиваются, что связано с затуплением зерен (рис. 5).

После правки круга величина импульса возвращается к исходной. Если работать до полной потери кругом режущей способности, то импульсы мгновенной температуры постепенно исчезают при повышении величины контактной температуры. Это свидетельствует о том, что рабочая поверхность круга в результате затуплений зерен засаливается, превращается в сплошную, и круг не столько режет, сколько трется о поверхность (рис. 5 и рис. 6).

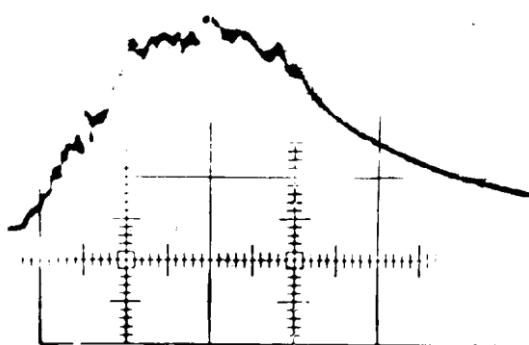


Рисунок 5 – Характерная осциллограмма теплового импульса от затупившегося и засаленного круга

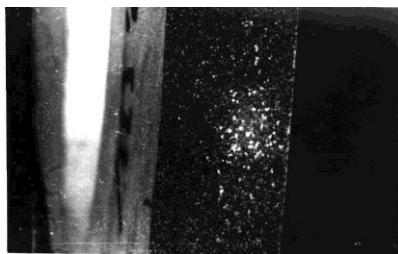


Рисунок 6 – Фотографія поверхні круга із КНБ після 100 проходів, які застосовувалися на сталі H18K9M5T, при шліфуванні на режимах:  
 $v_{kp} = 35 \text{ м/с}$ ,  $v_d = 0,25 \text{ м/с}$ ,  $t = 0,015 \text{ мм}$ ,  $s = 5 \text{ мм/ход}$

Установлено, що удельний износ кругов із КНБ на бакелітових связках на 25...30% вище, ніж износ кругов на кераміческих связках, що пояснюється більшою прочністю керамічної связки.

Залежність величини удельного износа кругов із КНБ від факторів обробки має наступний вигляд:

$$q = \frac{v_d^{0,07} \cdot t^{0,44} \cdot s^{0,16} \cdot \sigma^{0,75}}{v_{kp}^{0,33} \cdot r^{0,13}}. \quad (5)$$

На рис. 7 і 8 приведені залежності удельного износа від факторів обробки.

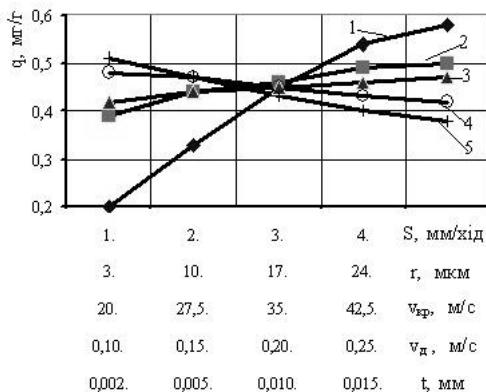


Рисунок 7 – Залежність удельного износа кругов із КНБ від режимів шліфування:

1 –  $q = f(t)$ , 2 –  $q = f(s)$ , 3 –  $q = f(v_d)$ , 4 –  $q = f(r)$ , 5 –  $q = f(v_{kp})$

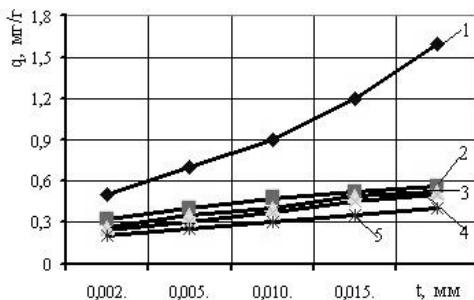


Рисунок 8 –Залежність уделного износа кругов из КНБ от глубини шлифування, свойств оброблюваного матеріала и характеристик кругов:  
1 – H18K9M5T, L12C1K; 2 – 12X2H3A, L5C1K; 3 – 12X2H3A, L12C1K;  
4 – 12X2H3A, L20C1K; 5 – сталь 45, L12C1K

### Выводы:

Проведенные исследования показали, что:

1. Величина углубления режущего зерна в металле по большей степени зависит от режимов шлифования, чем от характеристик шлифуемого материала.
2. На объем металла удаляемым зерном довольно сильно влияют два фактора: 1) размер режущего зерна, так как от него зависит общий объем удаляемого металла, и, 2) скорость вращения шлифовального круга, хотя это прямо пропорционально количеству снимаемого материала за один проход, однако значительно увеличивает количество проходов за определенный отрезок времени.
3. Удельная мощность резания большей степени зависит от скорости вращения шлифовального круга, чем от других параметров шлифования.
4. Производительность процесса шлифования мартенситно–стареющих сталей значительно ниже, чем при шлифовании обычных конструкционных сталей. Это связано с затуплением и вырывом зерен из связки.
5. Удельный износ зависит от подачи шлифовального круга, а от остальных режимов шлифования зависит мало.

**Список использованных источников:** 1. Редько С.Г. Процессы теплообразования при шлифовании металлов. Изд. Саратовского университета. Саратов, 1962. 2. Резников А.Н. Теплофизика резания. М., "Машиностроение", 1969. 3. Маслов Е.Н Теория шлифования материалов. М.: Машиностроение, 1984. 4. Федотов А.К. Физическое материаловедение: в 3-х томах. Минск: Выш. шк., 2012. 5. Биронт В.С. Теория термической обработки. СФУ: ИЦМиЗ. Красноярск, 2007. 6. Чумаченко Т.В. Лебедев В.Г. Фактическое расстояние между режущими зернами в эльборовом круге № 2, Проблемы техники, 2009.

**Bibliography (transliteratred):** 1. Red'ko S.G. Processy teploobrazovaniya pri shlifovanii metallov. Izd. Saratovskogo universiteta. Saratov, 1962. 2. Reznikov A.N. Teplofizika rezaniya. M., "Mashinostroenie", 1969. 3. Maslov E.N Teoriya shlifovanija materialov. M.: Mashinostroenie, 1984. 4. Fedotov A.K. Fizicheskoe materialovedenie: v 3-h tomah. Minsk: Vysh. shk., 2012. 5. Biront V.S. Teoriya termicheskoy obrabotki. SFU: ICMiZ. Krasnojarsk, 2007. 6. Chumachenko T. V. Lebedev V.G. Fakticheskoe rasstojanie mezhdu rezhushchimi zernami v jel'borovom krige № 2, Problemi tekhniki, 2009.

П.С. Носов, д-р техн. наук, О.Є. Яковенко, канд. техн. наук,  
В.М. Тонконогий, д-р техн. наук, Одеса, Україна

## ПРОЕКТУВАННЯ МОДУЛЬНОГО КОРСЕТУ ДЛЯ ЛІКУВАННЯ СКОЛОЗУ З ВИКОРИСТАННЯМ ЗАСОБІВ 3D МОДЕЛЮВАННЯ

Запропоновано конструкцію модульного корсету для лікування сколіозу, що містить основу, виконану з еластичного матеріалу, лікувальні елементи, утримуючий елемент і фіксуючий засіб, який відрізняється тим, що утримуючий елемент виконаний у вигляді жорсткої рами, на якій зафіксовані модульні лікувальні елементи і пластина управління

**Ключові слова:** ортопедичний корсет, сколіоз, 3D моделювання, медичні пристосування

Предложена конструкция модульного корсета для лечения сколиоза, содержащая основу, выполненную из эластичного материала, лечебные элементы, крепежный элемент и фиксирующее средство, которая отличается тем, что крепежный элемент выполнен в виде жесткой рамы, на которой зафиксированы модульные лечебные элементы и пластина управления

**Ключевые слова:** ортопедический корсет, сколиоз, 3D моделирование, медицинские приспособления

*The construction of a modular corset for the treatment of scoliosis is proposed, comprising a base, which is made of an elastic material, medical elements, a fastening member and a fixing device, which differs in that its fixing element is made in the form of a rigid frame, on which the modular medical elements and the control board are fixed*

**Keywords:** orthopedic corset, scoliosis, 3D modeling, medical devices

**Вступ.** В наш час, незважаючи на тривале вивчення питань лікування сколіозу, не існує доведеного методу здатного усувати деформацію хребта або гарантовано зупиняти її прогресію у дітей та підлітків [1]. Консервативне лікування сколіозу ефективно лише при початкових стадіях хвороби, при важких і швидко прогресуючих формах сколіозу ефективна лише хірургічна корекція [2]. До традиційного лікування сколіозу відносяться: лікувальна фізкультура, лікувальний масаж, міостимуляція м'язів і корсетування.

**Аналіз літературних джерел.** Найбільш складною формою лікування сколіозу є запобігання прогресії хвороби при ефективній корсетотерапії, що дозволяє зменшити кут деформації хребта та бальовий синдром. У світовій практиці корсетування ось уже понад 30 років є основним науково доведеним способом лікування проміжних форм (II-III ст) сколіозу, а решта вищеназвані методики - його доповненням. Сучасні корсети з доведеною клінічною ефективністю є активними ортопедичними виробами, які забезпечують виправлення існуючої деформації, перешкоджаючи подальшу прогресію сколіозу [3]. Ефективне використання коригуючих корсетів при лікуванні дис-пластичного сколіозу можливо за умови триваючого росту пацієнта.

Діапазон кута викривлення, при якому призначається коригуючий корсет, за даними різних авторів коливається від 20 до 60 градусів за Коббом.

Мілууоки (Milwaukee)-корсет має стабілізуючу (що не дозволяє розвиватися викривленню) дію на хребет, а не коригуючу (що впливає на викривлення). Має кільце на шиї поєднане штангами з тазовим корсетом. Хворий повинен активно випрямлятися при опорі на потиличний пелот.

Бостонський коригуючий корсет сколіозу з готових модулів виготовлено за профілем здорової людини. На передній і задній вертикальних шинах прикріплена роз'ємна тазова гільза з кріпленими на тулубі. Залежно від виду сколіозу на шини прикріплюються поперековий і грудний пелоти.

Корсет Шено (Cheneau brace) - конструкція корсета враховує всі основні відділи скелета, що зачленені у процесі деформації хребта людини. Корекція здійснюється створеною системою дії сил в трьох точках. Сила тиску, діюча на опуклості поверхні тіла створює ефект трансформації увігнутих ділянок у створені в корсеті вільні.

На сьогоднішній день більшість корсетів в Європі виготовляють не за гіпсовим зліпком фігури, а за допомогою комп'ютерного моделювання тіла пацієнта під майбутній корсет, що спрощує виготовлення ортеза [4]. Відомі ортопедичні корсети, що містять також лікувальні засоби з магнітним, тепловим та електричним впливом, мають спинку з розташованими на відстанях один до одного кишенями, в яких закріплена ребра, виконані жорсткими у напрямку, що є перпендикулярним до площині спинці та з'єднаним зі спинкою фіксуючим засобом для закріплення корсета на відповідному відділі тулуба людини, причому або спинка або фіксуючий засіб виконані з можливістю регулювання обхвату корсетом відділу тулубу людини [патенти UA №29610, UA №48641, UA №69579, RU 100719 U1]. Недоліком усіх цих технічних рішень є відсутність засобів регульованого механічного корегувального впливу безпосередньо на кожний хребець людини за індивідуальною лікувальною програмою, що спричинює недостатньо сильний лікувальний або оздоровчий ефект та обумовлює значну тривалість окремих лікувальних або оздоровчих процедур.

Відомий аналогічний пристрій [патент UA №29610] для запобігання викривленню постави також кріпиться на тулубі людини використовуючи міцний корсет із тканини. Але даний аналог не має рухомих елементів для поступової зміни положень хребців людини по лікувальній траєкторії, він є жорстким, що викликає атрофування м'язів відповідальних за підтримку постави, не дозволяє динамічно ідентифікувати положення хребта людини у просторі як засіб комп'ютерної сигналізації відхилень у режимі реального часу.

Найбільш близькою є конструкція, наведена в патенті [UA 29610]. Корсет містить спинку з розташованими на відстанях одна від одної кишенями, в яких закріплена ребра, виконані жорсткими або еластичними у

напрямку, перпендикулярному площині спинки, та з'єднаний зі спинкою фіксуючий засіб для закріплення корсета на відповідному відділі тулуба людини, додаткові лікувально-оздоровчі елементи у вигляді голок, закріплених у спинці, при чому частина голок виконана з частковим покриттям із хрому, нікелю, міді або срібла таким чином, щоб зони поблизу вістер голок були утворені щонайменше з двох матеріалів з різними електрохімічними потенціалами та має додаткові лікувально-оздоровчі елементи виконані у вигляді гумових смужок - магнітофорів, закріплених з проміжками на ребрах.

Але даний ортопедичний корсет має наступні недоліки:

- не щільне прилягання до поверхні тіла;
- не має прямого безпосереднього впливу на зміну положення кожного хребця людини траекторії при сколіозі;
- не можливо програмовано подавати через лікувальні елементи вібраційні на теплові впливи;
- не можливо ідентифікувати положення лікувальних елементів у просторі і динаміку їх переміщення;

Отже, не дивлячись на широкий діапазон конструкцій корсетів і сучасних засобів виготовлення залишається проблема в тому, що відсутня можливість підстроювання корсета в режимі on-line. Існуючі засоби індивідуального підстроювання мають досить жорстку конструкцію з великим кроком кріплень у вигляді ременів і т.п. Крім того корсети статичні і не мають пересувних частин для точкової корекції хребців пацієнта [5-9].

**Матеріал та результати дослідження.** Все вище зазначене дає підстави вважати, що розробка корсету із застосуванням сучасних 3D технологій [10] та можливістю гнучкого підстроювання в режимі реального часу засобами керуючої комп'ютерної програми є актуальним завданням дослідження.

В основу розроблюваної моделі поставлено задачу створити модульний корсет для лікування сколіозу, в якому шляхом об'єднання декількох модульних лікувальних елементів і особливості конструкційного виконання модульного лікувального елемента, забезпечити підвищення ефективності лікування сколіозу за рахунок діагностування відхилень відносно кожного хребця людини у реальному часі, а також зменшити вагу, підвищити надійність конструкції.

Поставлена задача вирішена конструкцією модульного корсету для лікування сколіозу, що містить, основу, виконану з еластичного матеріалу, лікувальні елементи, утримуючий елемент і фіксуючий засіб, тим, що на відміну від аналогів, утримуючий елемент виконаний у вигляді жорсткої рами, на якій зафіксовані модульні лікувальні елементи і плати управління. Okрім того, кожен модульний лікувальний елемент виконаний у вигляді корпусу, всередині якого установлений кроковий двигун, патронний керований нагрівач, вібратор, та електронний модуль визначення

координат, при цьому кроковий двигун сполучений з ходовим валом для переміщення модульного лікувального елемента, на верхній частині корпусу виконані вушка для закріплення балансувальних джутів, а в нижній частині корпусу виконана заглибина для хребця, при цьому кроковий двигун, патронний керований нагрівач, вібромотор та електронний модуль визначення координат сполучені з платою управління.

Модульний корсет для лікування сколіозу зображеній на рис. 1-4:

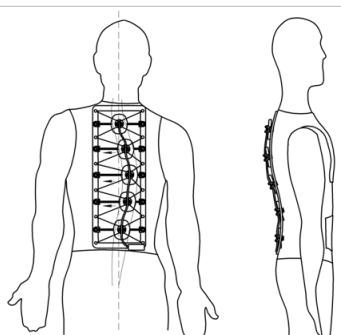


Рисунок 1 – вид корсету  
на тілі людини

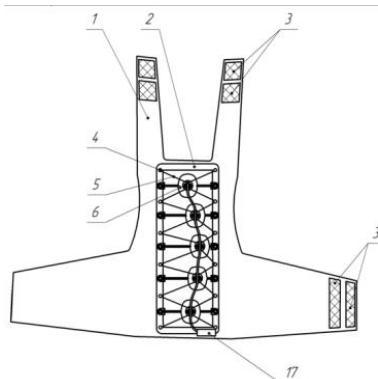


Рисунок 2 – вид корсету  
у розгорнутому виді

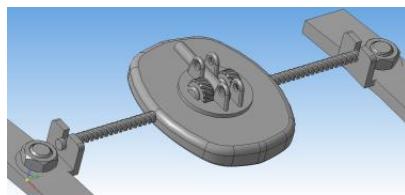
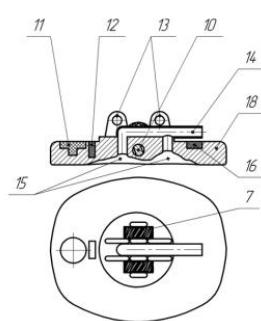
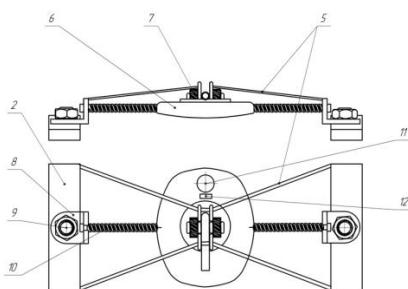


Рисунок 3 – фрагмент кріплення  
модулю відносно рами корсету

Рисунок 4 – конструкція модуля  
у розрізі та горизонтальному виду

Модульний корсет для лікування сколіозу виконаний у вигляді набору модульних лікувальних елементів 6, що прикріплені до металевої прямокутної рами 2 кронштейнами 8 з'єднанням гвинт-гайка 9. Рама 2 сполучена із основою корсету 1 через отвори 4. Основа корсету 1 виконана із міцної тканини має застібки 3 для його зручного використання та забезпечує можливість регулювання обхвату корсетом всіх відділів хребта людини. Модульні лікувальні елементи 6 сполучаються між собою трубками для відкачування повітря 14, наприклад, за допомогою мікрокомпресора магнітоелектричного МКМ -7 (на кресленні не показано) та електричними і інформаційними проводами. Кожен модульний лікувальний елемент 6 містить корпус 18, виконаний з полімерного матеріалу (ABS). В корпусі 18 установлено кривий двигун 7 (наприклад, PM20L-020-CTD3), що передає рух до ходового валу 10 для переміщення модульного лікувального елементу 6. Корпус 18 також оснащено патронним керуванням нагрівачем 12 (наприклад, M1020 Pt6,8 32208172), вібромотором 11 (наприклад, Apple iPhone 5) та електронним модулем визначення координат 16 (наприклад, акселерометр для мобільних телефонів GY-298 ADXL346Z, SPI / I2C). Сигнали від електронних модулів надходять до плати управління 17, що розташована у нижній частині корсету і захищена корпусом із полімеру ABS. На корпусі 18 виконані вушка 13 для закріплення гумових балансувальних джгутів 5, у нижній частині є заглибина для хребця 15 (отримано шляхом сканування 3D Systems Sense, фрагментів тіла людини та 3D друку).

Модульний корсет використовується в наступному порядку.

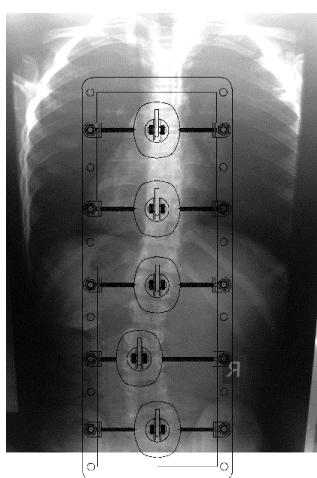


Рисунок 5 – Фіксація корсету відповідно до розташування хребців

Спочатку визначаються положення та кількість модульних лікувальних елементів 6 (від п'яти до семи) в залежності від амплітуди викривлення хребта людини, при цьому перший і останній модульний лікувальний елемент 6 повинні бути розташовані над хребцями, що не мають викривлень відносно еталонної траекторії хребта, а інші модульні лікувальні елементи розташовуються між ними уздовж хребта, утворюючи таким чином замкнену криву для більш ефективного лікувального впливу (Рис. 5).

Коли модульні лікувальні елементи 6 виставлені шляхом пересування по ходових валах 10, вони прикріплюються до рами 2 гвинтами 9 через кронштейни 8, які також утримують ходові вали 10.

Далі натягаються гумові джгути 5 утворюючи навантаження на модульні лікувальні елементи 6 і більше притискання до хребців. Утримуючи конструкцію, остаточно прикріплюється рама 2 до основи корсету 1 через отвори 4 і стягається на тілі для забезпечення достатньої надійності функціонування без обмежень у пересуванні і базових рухів людини. До всіх трубок для відкачування повітря 14 модульних лікувальних елементів 6 приєднуються шланги. На внутрішні модульні лікувальні елементи 6, що мають змінювати положення хребців, установлюються електронні модулі визначення координат 16, патронні керовані нагрівачі 12, вібромотори 11 та підключається живлення до крокових двигунів 7. Всі дроти та шланги сполучаються з платою управління 17, що розташована у нижній частині корсету, де також розташовано акумулятор живлення.

Спочатку налаштування модульних лікувальних елементів 6 і виконання необхідних підключень має робити тільки медичний працівник. Він також установлює програму і визначає сеанси, від трьох до семи, самостійного використання корсету у певні проміжки часу, визначає додаткові особливості експлуатації корсету. Запропоновані наступні сеанси людина може пройти без участі медичного працівника не завжди знаходячись вдома. Під час використання корсету не слід піднімати навантаження, що перевищують 8-10 кг, робити різких рухів та змінювати запропоновану програму. Пацієнт може виконувати нескладну роботу, що не передбачає нахили та повороти з великою амплітудою.

Під час експлуатації корсету модульні лікувальні елементи 6 переміщаються з різною амплітудою від 0,06 до 0,24 мм. Кількість рухів за сеанс не перевищує трьох-чотирьох, змінюючи положення хребця лише до 1 мм.

Таким чином виконується поступова нетравматична процедура повільного лікувального впливу.

За рахунок вібрації та нагрівання забезпечується ефект масажу що позитивно впливає на перебіг ортопедичного сеансу лікування. В окремих випадках для більш щільного притискання модулів до хребців можна застосовувати спеціальні медичні пасті та клей (ВербаФарм БФ-6). Після завершення першого циклу сеансів пацієнт повинен прийти до лікаря для встановлення нової програми лікування.

Експериментально встановлено, що корсет доцільно використовувати у випадках I та II ступенів сколіозу самостійно і III ступеню під наглядом



Рисунок 6 – Патент на корисну модель

лікаря ортопеда. За результатами розробки отримано патент на корисну модель України №115015 (Рис. 6).

**Висновок.** Модульний корсет для лікування сколіозу буде використано у безпосередній лікарській практиці для лікування дітей із вадами опорно-рухового апарату у закладах діагностики та реабілітації. Подальші дослідження буде спрямовано на розробку програмно-апаратних засобів для більш дісвої діагностичної та корегуючої дії розробленого модульного корсету.

**Список літератури:** 1. *Young Hong J-Y. Evaluation of the three-dimensional deformities in scoliosis surgery with computed tomography: efficacy and relationship with clinical outcomes / J. Young Hong, S. Seung-Woo, T. R. Easwar et al. // Spine* (Impact Factor: 2.16). – 02/2011. – Vol. 36 (19). – P. E1259-E1265. 2. *Ran B. Comparison of the sagittal profiles among thoracic idiopathic scoliosis patients with different Cobb angles and growth potentials / B. Ran, G. Y. Zhang, F. Shen et al. // J Orthop Surg Res.* – 2014. – Vol. 17; 9 (1). – P. 19. 3. *Бодян О.П. Профілактика та корекція порушень постави у молодших школярів в умовах недостатньої функціональної спроможності опорно-рухового апарату / О.П. Бодян, Д.Д. Сотовісік // Сучасні проблеми фізичного виховання, спорту та здоров'я людини: зб. наук. пр. – Кам'янець-Подільський: К-ПНУ імені Івана Огієнка, 2012. – Вип. 3. – С. 43-46.* 4. *Berryman F. A new system for measuring three-dimensional back shape in scoliosis / F. Berryman, P. Pynsent, J. Fairbank, S. Disney // Eur Spine J.* – 2008. – Vol. 17 (5). – P. 663-672. 5. *Носов П.С., Яланський А.Д., Яковенко В.А. Проектування 3D моделі реабілітаційного корсету як засобу комп'ютерної діагностики постави // Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харків: Технол. центр, 2013. – № 3/2 (63). – С. 30-33.* 6. *Носов П.С. 3D Modelirovaniye konstrukcii ortopedicheskogo korseta v Delcam PowerShape-FeatureCam. Науковий вісник ХДМА. Науковий журнал. – Херсон: ХДМА, 2013. – № 1(8) – С. 241-247.* 7. *Тонконогий В.М., Савельєва Е.В., Бець А.В. Информационные технологии проектирования в ортопедии // Збірник наукових праць «Інформаційні технології в освіті, науці та виробництві». – Одеса: ОНПУ, АО «Бахва», 2013. – Випуск 1 (2). – С. 182-188.* 8. *Носов П.С., Яковенко В.Д., Тонконогий В.М. Устроство для комп'ютерной коррекции отклонений осанки // Збірник наукових праць НТУ «ХПІ» «Високі технології в машинобудуванні». – 2013. – № 1. – С. 132 – 140.*

**Bibliography (transliterated):** 1. *Young Hong J-Y. Evaluation of the three-dimensional deformities in scoliosis surgery with computed tomography: efficacy and relationship with clinical outcomes / J. Young Hong, S. Seung-Woo, T. R. Easwar et al. // Spine* (Impact Factor: 2.16). – 02/2011. – Vol. 36 (19). – P. E1259-E1265. 2. *Ran B. Comparison of the sagittal profiles among thoracic idiopathic scoliosis patients with different Cobb angles and growth potentials / B. Ran, G. Y. Zhang, F. Shen et al. // J Orthop Surg Res.* – 2014. – Vol. 17; 9 (1). – P. 19. 3. *Bodjan O.P. Profilaktika ta korekcija porushen' postavi u molodshih shkoljariv v umovah nedostatn'oї funkcionalo'noi spromozhnosti oporno-ruhovogo aparatu / O.P. Bodjan, D.D. Sovtisik // Suchasni problemi fizichnogo vihovannja, sportu ta zdorov'ja ljudini: zb. nauk. pr. – Kam'janec'-Podil's'kij: K-PNU imeni Ivana Ogienka, 2012. – Vip. 3. – S. 43-46.* 4. *Berryman F. A new system for measuring three-dimensional back shape in scoliosis / F. Berryman, P. Pynsent, J. Fairbank, S. Disney // Eur Spine J.* – 2008. – Vol. 17 (5). – P. 663-672. 5. *Nosov P.S., Jalanskij A.D., Jakovenko V.A. Proektuvannja 3D modeli rehabilitacijnogo korsetu jak zasobu komp'juternoї diagnostiki postavi // Shidno-Європейскij zhurnal peredovih tehnologij. – Harkiv: Tehnol. centr, 2013. – № 3/2 (63). – S. 30-33.* 6. *Nosov P.S. 3D Modelirovanie konstrukcii ortopedicheskogo korseta v Delcam PowerShape-FeatureCam. Naukovij visnik HDMA. Naukovij zhurnal. – Herson: HDMA, 2013. – № 1(8) – S. 241-247.* 7. *Tonkonogij V.M., Savel'eva E.V., Bec A.V. Informacionnye tehnologii proektirovaniya v ortopedii // Zbirnik naukovih prac' «Informacijni tehnologii v osviti, nauci ta virobniictvi». – Odessa: ONPU, AO «Bakhva», 2013. – Vipusk 1 (2). – S. 182-188.* 8. *Nosov P.S., Jakovenko V.D., Tonkonogij V.M. Ustrojstvo dlja komp'juternoj korrektsii otklonenij osanki // Zbirnik naukovih prac' NTU «HPI» «Visoki tehnologii v mashinobuduvanni». – 2013. –No 1. – S. 132-140.*

Л.А. Петрусенко, В.С. Антонюк, д-р техн. наук, Київ, Україна

## АНАЛИЗ РАЗРУШЕНИЯ ТВЕРДОСПЛАВНОГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ ВРЕЗАНИИ

Проведен анализ работ по исследованиям влияния переходных процессов врезания на прочность твердосплавного лезвийного режущего инструмента. Обосновано отсутствие предпосылок для «подскоков сил резания» при врезании.

Для объяснения причин хрупкого разрушения твердосплавного режущего инструмента рассмотрены этапы переходного процесса при врезании и проведен анализ уровня напряжений, возникающих в «опасной зоне» передней поверхности инструмента.

Доказана возможность превышение уровня напряжений в опасной зоне в момент врезания относительно установленногося периода резания за счёт неблагоприятного направления действия силы резания и меньшего расстояния от вершины клина до «опасной зоны» передней поверхности режущего инструмента.

**Ключевые слова:** твердосплавный режущий инструмент, прерывистое резание, врезание, хрупкая прочность инструмента, уровень напряжений

Проведено аналіз робіт з досліджень впливу переходних процесів врізання на міцність твердосплавного лезового різального інструменту. Обґрунтовано відсутність передумов для «підскоку сил різання» при врізанні.

Для пояснення причин крихкого руйнування твердосплавного різального інструменту розглянуті етапи переходного процесу при врізанні і проведено аналіз рівня напружень, що виникають в «небезпечній зоні» передньої поверхні інструмента.

Доведено можливість перевищення рівня напружень в «небезпечній зоні» в момент врізання щодо стального періоду різання за рахунок несприятливого напряму дії сили різання і меншої відстані від вершини клина до «небезпечної зони» передньої поверхні різального інструмента.

**Ключові слова:** твердосплавний різальний інструмент, переривчасте різання, врізання, крихка міцність інструменту, рівень напружень.

*This work devoted to studies of the transient plowing influence processes on the carbide cutting strength tools is carried out. The absence prerequisites for the "jumping cutting forces" during insertion is grounded.*

*To explain the brittle fracture causes of carbide cutting tool, the stages of transient process during the incision are considered and the stress level occurs in "dangerous zone" of front surface tool is analyzed.*

*The possibility exceeding the level of stresses in danger zone at the moment of incision with respect to the steady-state cutting period is proved due to the unfavorable cutting force direction and shorter distance from the top of wedge to "dangerous zone" of the front surface.*

**Key words:** carbide cutting tool, intermittent cutting, cutting, brittle tool strength, stress level

### Введение

Применение твёрдых сплавов в качестве инструментального материала для изготовления лезвийного режущего инструмента позволило многократно повысить режимы резания и эффективность обработки деталей, а также дало

возможность обработки заготовок из новых высокопрочных материалов. В то же время, это привело к появлению нового вида отказа работоспособности инструмента, не характерного для применявшегося ранее инструмента, изготовленного из быстрорежущих сталей – хрупкому разрушению режущей части в виде сколов и выкрашиваний. Такие разрушения могут происходить задолго до достижения предельного износа инструмента и они связаны с более низким сопротивлением твёрдых сплавов растягивающим напряжениям, возникающим в процессе резания [1, 2].

Эти свойства твердосплавного инструмента проявляются при черновой обработке неравномерного припуска и, особенно, на операциях прерывистого резания (строгание, фрезерование, зубообработка и др.). При этом стойкость твердосплавного инструмента при прерывистом резании оказывается значительно ниже, чем при непрерывном резании (например, точении).

Снижение работоспособности инструмента, работающего в условиях прерывистого резания, объясняется цикличностью возникающих механических и тепловых нагрузок на режущий инструмент, а также наличием переходных процессов при врезании и выходе инструмента. Несмотря на большое количество опубликованных работ по прерывистому резанию, механизм переходных процессов изучен недостаточно, а объяснения причин разрушения режущей части инструмента при врезании носят принципиально противоречивый характер [3 – 5].

Большинство исследований процесса врезания направлено на изучение динамики изменения величины главной составляющей силы резания  $P_z$ , а также определению предельной толщины среза («ломающей подачи») при прерывистом и непрерывном резании. Многими авторами были предложены формулировки: «удар при врезании», «всплеск силы резания», «динамическая сила резания» и т.п. [6, 7].

Однако, в ряде исследований переходного процесса врезания авторы отмечали плавный рост составляющей силы резания  $P_z$  от нуля до величины установившегося резания, а также указывали на отсутствие физических предпосылок для «всплесков» сил резания в этот момент [4, 8, 9].

Получаемые при использовании тензометрических динамометров «всплески» электрических сигналов на осциллографах в момент врезания объясняются не «подскоками» силы резания, а реакцией упругого звена динамометра на быстропротекающий, неэкстремальный рост силы резания в переходной период. Анализ исследований динамики сил резания при врезании и обоснование отсутствия «всплеска» сил резания приведены в работе [10].

**Целью настоящей работы** является изучение факторов, влияющих на хрупкое разрушение режущей части инструмента в момент врезания.

**Основная часть.** В исследованиях хрупкого разрушения твердосплавного инструмента установлено, что величина предельной

толщины среза  $a_{np}$ , при прерывистом резании в 1,3...1,7 раз ниже, чем при точении, а разрушение режущего клина происходит только в момент врезания инструмента в заготовку. Если же в период врезания разрушение не происходит, то после наступления установившегося процесса резания, такое разрушение не наблюдается. Характер разрушения режущего клина при врезании указывает на возникновение растягивающих напряжений, опасных для режущего инструмента из твёрдых сплавов [1, 7].

Поэтому, для установления причин хрупкого разрушения твердосплавного инструмента при врезании, кроме изучения характера изменения сил резания при врезании, необходим расчёт величин напряжений, возникающих в опасной зоне передней поверхности инструмента в этот момент, а также определение факторов, влияющих на уровень этих напряжений [11].

**Особенности переходных процессов при врезании.** Наличие переходных процессов врезания часто связывают только с операциями прерывистого резания. Но переходной процесс врезания существует при любом виде обработки резанием, в том числе и точении.

При этом следует различать два принципиально разных типа переходных процессов:

**Тип I.** В момент касания режущего клина и срезаемого слоя ( $t_0$ ) толщина среза имеет нулевую величину, а максимальная, заданная режимами резания, толщина среза ( $a$ ) достигается через определённый промежуток времени ( $t_{ycm}$ ).

Для точения период достижения максимального значения силы резания соответствует времени одного оборота детали, а длина пути резания равна длине окружности обрабатываемой поверхности. Такой же тип процесса врезания наблюдается и при встречном цилиндрическом фрезеровании (рис. 1. a).

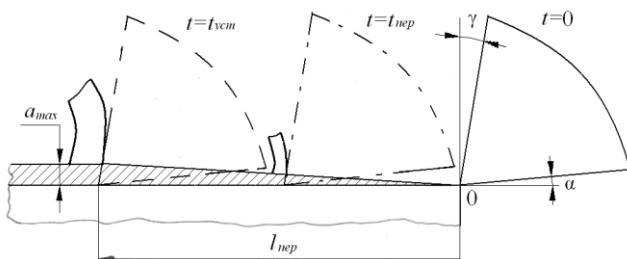


Рисунок 1 – Схема переходного процесса при встречном цилиндрическом фрезеровании (тип I)

**Тип II.** В момент касания режущего клина и заготовки площадь контакта между ними достигает заданного режимами резания значения.

При этом происходят быстропротекающие процессы, определяющие нормальные усилия на переднюю поверхность инструмента, а затем, после определённого периода времени ( $t_{nep}$ ), начинается движение срезаемого слоя (стружки), формирование зоны контакта, повышение температуры резания и рост силы трения до уровня установленного процесса ( $t_{vcm}$ ).

Такой тип врезания характерен для операций строгания, попутного и торцевого фрезерования (рис. 1.б).

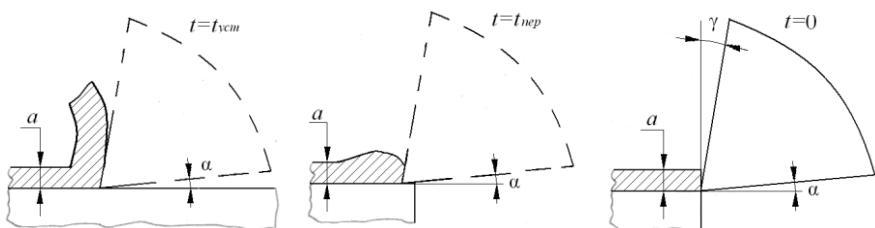


Рисунок 2 – Схема переходного процесса при попутном и торцевом фрезеровании (тип II)

Различие между первым и вторым типами переходных процессов врезания заключается в последовательности формирования нормальных и тангенциальных усилий на передней поверхности, а также в их продолжительности.

Установлено, что область растягивающих напряжений начинается в конце зоны контакта инструмента, максимальный уровень которых возникает в «опасной зоне» передней поверхности, расположенной на расстоянии от вершины, равной 2...2,5 длины контакта [2, 11].

Для расчётов напряжений возникающих за пределами зоны контакта можно использовать известный принцип Сен-Венана – замена фактических распределённых контактных нагрузок на сосредоточенную силу резания  $P$ , приложенную к вершине режущего угла.

В работе [12] предложено преобразование формулы А.И. Бетанели [1] для расчёта напряжений в режущем клине инструмента к виду:

$$\sigma_1 = \frac{K_z P_z - K_y P_y}{br} \quad (1)$$

где  $K_z$ ,  $K_y$  – коэффициенты;  $P_z$ ,  $P_y$  – составляющие силы резания;  $b$  – ширина среза;  $r$  – расстояние от вершины до расчётной точки передней поверхности.

Коэффициенты  $K_z$  и  $K_y$  постоянны при заданных углах режущего клина  $\gamma$  и  $\alpha$ , рассчитаны и приведены в работе [13].

Как видно из формулы 1, для расчёта напряжений в опасной зоне необходимо иметь значения 2-х составляющих силы резания –  $P_z$  и  $P_y$ . При этом уровень напряжений определяется не только от величиной равнодействующей силы резания, но и углом действия этой силы,  $\omega$ .

Причём фактор направления вектора равнодействующей ( $\operatorname{tg} \omega = P_y/P_z$ ) может иметь решающее значение при определении уровня напряжений [13, 14].

Предложенная схема переходного процесса врезания (тип II, рис.1,б) предполагает реальное «отставание» процессов трения в зоне контакта и, соответственно, больший период времени роста составляющей силы резания  $P_y$  до уровня установившегося процесса. Таким образом при врезании величина составляющей силы резания  $P_y$  меньше чем при установившемся резании. Но, согласно формуле 1, чем меньше величина  $P_y$  (при установившейся составляющей силы резания  $P_z$ ), тем выше уровень возникающих напряжений.

Это подтверждается расчётами уровней напряжений по данным экспериментов с одновременным измерением величин составляющих  $P_z$  и  $P_y$  при врезании [15].

Поскольку величина составляющей силы резания  $P_y$ , в основном, определяется силами трения в зоне контакта на передней поверхности, рассмотрим особенности процессов, происходящих в переходной период врезания и их влияние на величины составляющих силы резания.

Для расчетов величины угла действия  $\omega$  и составляющей силы резания  $P_y$  используем зависимость из работы [16]:

$$\beta_{\text{тр}} = \omega + \gamma,$$

где  $\beta_{\text{тр}}$  - угол трения,  $\operatorname{tg} \beta_{\text{тр}} = \mu_{\text{тр}}$  (средний коэффициент трения);  $\omega$  - угол действия силы резания;  $\gamma$  - передний угол режущего клина.

Переходной период врезания режущего инструмента состоит из следующих этапов (рис. 3):

I. Внедрение режущего клина в заготовку, без снятия стружки.

Величина нормальных усилий и составляющей силы резания  $P_z$  растут до установившейся величины ( $P_z$  равно 100 ед. силы). С

резаемый слой удерживается в контакте с передней поверхностью силами трения покоя. Условно принимаем  $\mu_{\text{тр}} = 0,35$ , а передний угол  $\gamma = 10^\circ$ .

Тогда, рассчитав угол трения  $\beta_{\text{тр}}$  и угол действия  $\omega$ , получим величину  $P_y = 18$  ед. (рис. 3, период времени «0 – I»)

II. Давление поступающего в зону резания срезаемого слоя заготовки приводит к началу движения стружки по передней поверхности клина.

Коэффициент трения снижается. Примем  $\mu_{\text{тр}} = 0,3$ ), тогда расчетная величина составляющей  $P_y = 12$  ед (рис. 3, период времени «I – II»)

III. В зоне контакта с ростом температуры начинается адгезионное взаимодействие и развивается контактное пластическое течение. За счёт адгезионной составляющей средний коэффициент трения  $\mu_{cp}$  и величина составляющей  $P_y$  возрастают до показателей установившегося процесса резания.

Примем коэффициент трения для установившегося резания указывается значение  $\mu_{cp} = 0,5$ . При этом величина составляющей силы резания  $P_y = 30$  ед. (рис. 3, период времени «II – III»).

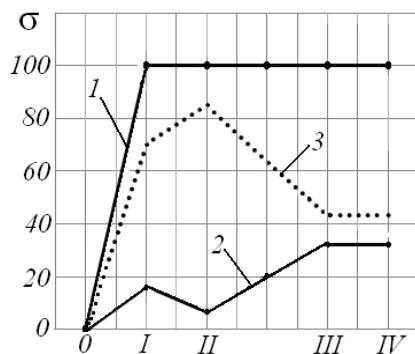


Рисунок 3 – Зависимость напряжений на передней поверхности инструмента в период врезания:

- 1 – составляющая силы резания  $P_z$ ;
- 2 – составляющая силы резания  $P_y$ ;
- 3 – расчётный уровень напряжений

Поэтому переходной период врезания можно считать полностью законченным после завершения всех вышеперечисленных этапов (рис. 3, период времени «II – IV»), а не только после выхода величины  $P_z$  на уровень установившегося резания.

По значениям составляющих  $P_y$  и  $P_z$  (рис.3, линии 1 и 2) по методике, приведенной в работе [13] выполнены расчёты величин напряжений на передней поверхности (рис. 3, линия 3) для каждого из этапов переходного периода врезания.

Как видно из рис. 3, за счёт меньшей величины составляющей силы  $P_y$  расчётный уровень напряжений на 85% выше, чем при установившемся резании (при равных величинах составляющей  $P_z$ ).

Кроме того, расстояние «r» (формула 1) от вершины клина до опасной точки в переходной момент врезания намного ниже (до 2 раз), чем при установившемся резании.

Но, согласно формуле 1, величина растягивающих напряжений обратно пропорциональна этому расстоянию. В результате, за счёт сочетания факторов – направление действия силы резания и меньшая длина зоны контакта при врезании возникает экстремальное (>2-х раз) превышение уровня напряжений в опасной зоне передней поверхности инструмента.

Для подтверждения предложенной схемы влияния различных факторов на величину напряжений при врезании, рассмотрим рис. 4 на котором приведены корни стружки в период врезания (а) и при установившемся резании (б) [17].

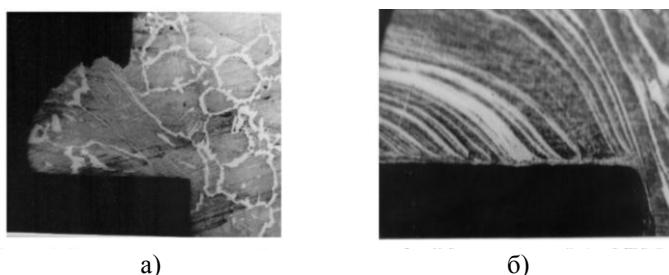


Рисунок 4 – Корень стружки  
в период врезания и при установившемся резании [17]  
(сталь 45 – ВК8;  $V = 60$  м/мин)

Из рис. 3 видно, что при врезании (а) процесс трения проходит по законам внешнего трения (внедрение пуансона), при этом средний коэффициент трения  $\mu_{tp}$  ниже, чем при установившемся резании (б), когда происходит значительная деформация слоёв стружки, прилегающих к зоне контакта.

Рассмотренная схема процесса врезания придаётает резанию острозаточенным клином с плоской передней поверхностью, когда величина составляющей силы  $P_y$  и направление силы резания определяются только силами трения.

На практике, для повышения прочности режущей части, в том числе при прерывистом резании, применяют инструмент с округлённой режущей кромкой или с фаской под отрицательным передним углом. Оптимальная величина радиуса округления кромки или ширина фаски рекомендуется в пределах 0,3...0,4 толщины срезаемого слоя [7].

При врезании наличие округления кромки или фаски приводит к формированию нагрузок на этих участках, способствующих быстрому росту величины составляющей силы  $P_y$  и развороту вектора силы резания (увеличению угла действия  $\omega$ ). Этот фактор, приводит к снижению уровня напряжений и повышению прочности твердосплавного режущего инструмента при врезании.

## Выводы

1. Хрупкое разрушение твердосплавного режущего инструмента в период врезания не может быть результатом «удара» или «подскоков силы резания». Удар при врезании возникает только в упругой системе привода станка.

2. Расчёты напряжений в опасной зоне передней поверхности показывают, что в момент врезания могут возникать напряжения, в 2...3 раза превышающие уровень напряжений установленного резания.

3. Причинами этого явления являются особенности переходного процесса:

- больший период стабилизации составляющей силы резания  $P_y$  по отношению к  $P_z$ ;

- меньшая, чем при установленном резании, длина контактной зоны и приближение «опасной зоны» к вершине режущего клина.

4. Для повышения прочности твердосплавного режущего инструмента при прерывистом резании рекомендуются методы округления режущей кромкой или выполнение фаски под отрицательным переднем углом, что изменяет направление вектора силы резания и способствует снижению уровня растягивающих напряжений в «опасной зоне» передней поверхности инструмента.

**Список использованной литературы:** 1. Бетанели А.И. Прочность и надежность режущего инструмента : научное издание / А. И. Бетанели. – Тбилиси : Сабчота Сакартвело, 1973. – 304 с.

2. Остафьев В.А. Расчет динамической прочности режущего инструмента. / В.А. Остафьев. – М.: Машиностроение. 1979. 168 с. 3. Лоладзе Т.Н. Определение напряжений в режущей части инструмента при переходных процессах. / Т.Н. Лоладзе, Г.Н Ткемаладзе., Ф.Г. Тотчев. – В кн.: Надежность режущего инструмента. Вып. 2, Киев-Донецк. 1975, с. 82-86. 4. Андреев Г.С. Удар при прерывистом резании // Вестник машиностроения. – 1971. – №3. – С. 65-68. 5. Симонян М.М. Развитие теоретических и технологических принципов повышения работоспособности твёрдосплавных инструментов в процессах прерывистого резания. Автореф. дисс. д.т.н., Ереван, 2013. 6. Вульф А.М. Резание металлов / А.М. Вульф Изд. 2-е. - Л.: «Машиностроение» (Ленингр. отд-ние), 1973. – 496 с. 7. Хает Г.Л. Прочность режущего инструмента. М.: Машиностроение. 1975. 167с. 8. Высокоскоростная фотосъемка начального процесса резания при обработке./ Дж. Тэ // Констр. и техн. Маш.: Тр. Амер. Общ. Инж.-механиков. М.: Мир, 1977.– №1. С.213-219.

9. Жирков А.А. Измерительно-вычислительный комплекс исследования закономерностей процессов прерывистого резания / А.А. Жирков, А.В. Катунин // Известия ОрёлГТУ. Машиностроение и приборостроение. – Орёл: ОрёлГТУ, 2003. – №3 – С. 92-94.

10. Петрусенко Л.А., Антонюк В.С. Динамика сил резания при врезании режущего инструмента // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: Зб. наук. праць. – Краматорськ: ДДМА, 2017/. – Вип. № 39. – С.168-175. 11. Остафьев В.А. Физические основы процесса резания. / В.А.Остафьев, В.С. Антонюк, С.П. Выслух [и др.]; под. общ. ред. В.А. Остафьева. – Киев: изд. «Вища школа», 1976. - 136 с. 12. Ильченко Н.Я., Ковтуненко В.Е., Петрусенко Л.А. Об особенностях напряженного состояния режущей части инструмента при прерывистом резании // Резание и инструмент. Харьков, 1979. – №22 – С.72-77. 13. Петрусенко Л.А., Антонюк В.С. Расчет напряжений, возникающих в опасной зоне лезвийной части режущего инструмента / Л.А. Петрусенко, В.С. Антонюк // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»: Машинобудування – К.: НТУУ «КПІ», 2016. – Вип.77. – С. 147-156.

14. Петрусенко Л.А., Антонюк В.С. Расчётный метод определения геометрических параметров

твёрдосплавного режущего инструмента. / Л.А.Петрусенко, В.С. Антонюк // Вісник НТУ «ХПІ» Серія Технології в машинобудування Харків: НТУ «ХПІ», №17 (1239). 2017. – С. 54-59.

**15.** Хандожко А.В., Тимошенко А.А., Петрусенко Л.А. Анализ факторов, вызывающих хрупкое разрушение твердосплавного режущего инструмента. // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем Вип. № 38 2016 С. 175-183. **16.** Основы теории резания материалов: Учебник / Мазур Н.П., Внуков Ю.Н., Грабченко А.И. и др. Под общ. ред. Н.П. Мазура и А.И. Грабченко. – 2-е изд. – Харьков: 2013. – 534 с. **17.** Повышение эффективности обработки резанием. Коллективная монография. Под ред. А.В. Киричека Изд. дом «Спектр». Москва. 2012. – 307с.

**Bibliography (transliterated):** **1.** Betaneli A.I. Prochnost' i nadezhnost' rezhushhego instrumenta : nauchnoe izdanie / A. I. Betaneli. – Tbilisi : Sabchota Sakartvelo, 1973. – 304 s. **2.** Ostaf'ev V.A. Raschet dinamicheskoy prochnosti rezhushhego instrumenta. / V.A. Ostaf'ev. – M.: Mashinostroenie. 1979. 168 s. **3.** Loladze T.N. Opredelenie naprjazhenij v rezhushshej chasti instrumenta pri perehodnyh procesah. / T.N. Loladze, G.N Tkemaladze., F.G. Totchiev. – V kn.: Nadezhnost' rezhushhego instrumenta. Vyp. 2, Kiev-Doneck. 1975, s. 82-86. **4.** Andreev G.S. Udar pri preryvistom rezanii //Vestnik mashinostroenija.1971. – №3. – S. 65-68. **5.** Simonjan M.M. Razvitiye teoretycheskih i tehnologicheskikh principov povyshenija rabotosposobnosti tvjordosplavnnyh instrumentov v processah preryvistogo rezanija. Avtoref. diss. d.t.n., Erevan, 2013. **6.** Vul'f A.M. Rezanie metallov / A.M. Vul'f Izd. 2-e. - L.: «Mashinostroenie» (Leningr. otd-nie), 1973. – 496 s. **7.** Haet G.L. Prochnost' rezhushhego instrumenta. M. Mashinostroenie. 1975. 167s. **8.** Vysokoskorosnaja fotos#emka nachal'nogo processa rezanija pri obrabotke./ Dzh. Tje //Konstr. i tehn. Mash.: Tr. Amer. Obshh. Inzh.-mekhanikov. M.: Mir, 1977.: №1, S.213-219. **9.** Zhirkov A. A. Izmeritel'no-vychislitel'nyj kompleks issledovanija zakonomernostej processov preryvistogo rezanija / A.A. Zhirkov, A.V. Katunin // Izvestija OrjolGTU. Mashinostroenie i priborostroenie. – Orjol: OrjolGTU, 2003. – №3 – S. 92-94. **10.** Petrusenko L.A., Antonjuk V.S. Dinamika sil rezanija pri vrezanii rezhushhego instrumenta // Nadijnist' instrumentu ta optimizacija tehnologichnih sistem: Zb. nauk. prac'. – Kramators'k: DDMA, 2017. – Vip. № 39. – S.168-175. - **11.** Ostaf'ev V.A. Fizicheskie osnovy processa rezanija. / V.A.Ostaf'ev, V.S. Antonjuk, S.P. Vyslouth [i dr.]; pod. obshh. red. V.A. Ostaf'eva. – Kiev: izd. «Vishha shkola», 1976. – 136 s. **12.** Il'chenko N.Ja., Kovtunenko V.E., Petrusenko L.A. Ob osobennostyah naprijazhonnogo sostojaniya rezhushhej chasti instrumenta pri preryvistom rezanii //Rezanie i instrument. Har'kov, 1979. – №22 – S.72-77. **13.** Petrusenko L.A., Antonjuk V.S. Raschjot naprijazhenij, vznikajushhih v opasnoj zone lezvijnoj chasti rezhushhego instrumenta / L.A. Petrusenko, V.S. Antonjuk // Visnik Nacional'nogo tehnichnogo universitetu Ukraina «Kiiv's'kij politehnichnij institut»: Mashinobuduvannja – K.: NTUU «KPI», 2016. – Vip.77. – S. 147-156. **14.** Petrusenko L.A., Antonjuk V.S. Raschjotnyj metod opredelenija geometricheskikh parametrov tverdospalvного rezhushhego instrumenta. / L.A.Petrusenko, V.S. Antonjuk // Visnik NTU «HPI» Serija Tehnologii v mashinobuduvannja Har'kiv: NTU «HPI», №17 (1239). 2017.– S. 54-59. **15.** Handozhko A.V., Timoshenko A.A., Petrusenko L.A. Analiz faktorov vyzyvajushhih hrupeoe razrushenie tverdospalvного rezhushhego instrumenta. // Nadijnist' instrumentu ta optimizacija tehnologichnih sistem Vip. № 38 2016 S. 175–183. **16.** Osnovy teorii rezanija materialov: Uchebnik / Mazur N.P., Vnukov Ju.N., Grabchenko A.I. i dr. ; pod obshh. red. N.P. Mazura i A.I. Grabchenko. –2-e izd. – Har'kov : 2013. – 534 s. **17.** Povyshenie jeffektivnosti obrabotki rezaniem. Kollektivnaja monografija. Pod red. A.V. Kiricheka Izd. dom «Spectr». Moskva. 2012. – 307s.

А.А. Симонова, канд. техн. наук, Кременчук, Україна

## ОЦІНКА ЦИКЛІЧНОЇ МІЦНОСТІ СУБМІКРОКРИСТАЛІЧНОЇ СТАЛІ СТ20

Розглянуто методи визначення циклічної міцності. Отримано експериментальні значення та побудовано криви утоми для субмікрокристалічної сталі Ст20, що отримана методом всебічного кування, а також після механічної обробки із різними режимами різання. Запропоновано алгоритм для побудови діаграми граничних напруженень у ППП ANSYS Workbench, який дозволяє робити оцінку опору утомі для циклів з різними коефіцієнтами асиметрії.

**Ключові слова:** циклічна міцність, граничні напруження

Рассмотрены методы определения циклической прочности. Получены экспериментальные значения и построены кривые усталости для субмикрокристаллической стали Ст20, а также после механической обработки с разными режимами резания. Предложен алгоритм для построения диаграммы граничных напряжений в ППП ANSYS Workbench, который позволяет делать оценку сопротивлению усталости для циклов с различными коэффициентами асимметрии.

**Ключевые слова:** циклическая прочность, граничные напряжения

The methods for determining the cyclic strength are considered. The experimental values have been obtained and fatigue curves for ultrafine-grained St20 steel have been constructed, as well as after machining with different cutting conditions. An algorithm is proposed for constructing the boundary stresses diagram in the ANSYS Workbench, which makes it possible to estimate the fatigue resistance for cycles with different asymmetry coefficients.

**Keywords:** cyclic strength, boundary stresses

Останні роки ознаменувалися зростаючим інтересом до субмікро- і нанокристалічних металів і сплавів, які відрізняються високими фізико-механічними властивостями.

Зазначені поєднання фізико-механічних властивостей припускають можливе використання виробів з субмікро- і нанокристалічних металів для ракетної та авіаційної техніки, автомобільного виробництва, медицини та ін.

В об'ємних заготовках формується субмікро- або нанокристалічна структура, що складається із зерен, розділених переважно нерівновагими високоенергетичними кордонами. При дії високих температур інтенсифікуються процеси рекристалізації, оскільки структура субмікро- і нанокристалічних металів є термічно нестабільний [1].

При виготовленні виробів, як правило, застосовують механічну обробку. Механічна обробка супроводжується значними пластичними деформаціями і високою температурою різання. Відзначені умови призводять до повернення

структурі металу в крупнокристалічний стан і втрати вихідних високих фізико-механічних властивостей [2, 3].

Однак, єдиної залежності у властивостях матеріалів, схильних до інтенсивної пластичної деформацією немає, тому що збільшення опору деформаціям може негативно позначитися на пружних характеристиках матеріалів. Тому на сьогоднішній день дослідження механічних властивостей матеріалу після інтенсивної пластичної деформації та механічної обробки є актуальну темою.

Підвищення характеристик міцності високоміцних матеріалів може бути досягнуто за рахунок зменшення розмірів зерна (зерногранічного зміцнення) і формування субструктур (субструктурне зміцнення). Ефективним способом поліпшення міцності є методи інтенсивної пластичної деформації (ІПД) [1].

В роботі [4] було доведено, що ІПД істотно підвищує властивості міцності титану і його сплавів.

Зразки нержавіючої сталі після ІПД має великий запас витривалості. У межах  $10^3 - 10^7$  циклів запас витривалості вище на ~ 100МПа порівняно з матеріалом без субмікро структури. Найбільше значення граници витривалості матеріалу після ІПД порядку 800МПа при частоті циклів  $6 \cdot 10^4$ , при цьому спостерігається швидке падіння витривалості (від 800МПа до 500МПа) [5]. Можна зробити висновок, що матеріал X18Н10Т з субмікрокристалічною структурою в діапазоні  $10^3 - 10^7$  циклів навантаження має підвищеними характеристиками міцності.

Представлені експериментальні роботи показали реальну можливість створення нових високоміцних матеріалів на основі крупнокристалічних матеріалів.

Термічно нестабільний стан НК та СМК структури може привести до зниження фізико-механічних та експлуатаційних характеристик даного класу матеріалів при механічній обробці. Тому важливе значення має вивчення оброблюваності металів із СМК структурою та впливу параметрів процесу різання на зміну експлуатаційних характеристик, у тому числі циклічної міцності.

В якості досліджуваного матеріалу обрана низько вуглецева Сталь 20 (Fe – 0,22C) у вихідному крупнокристалічному стані – прокат – діаметр 20,4 мм, довжина 100,2 мм. Отримання субмікрокристалічного стану здійснювалося методом всебічного кування, що включає в себе етапи осадки і протягування [1]. Розміри заготовки після ІПД діаметр 14,6 мм, довжина 177 мм.

Процес всебічного кування виконувався при нагріванні заготовки в індукційній печі. Після чотирьох проходів, що включають в себе операції осадки – протягування, отримані поковки охолоджували в сухому піску.

Досліджувані зразки, отримані на підприємстві ПАТ КрКЗ, м. Кременчук (Україна), по раніше розглянутій технології.

Експериментальні дослідження оброблюваності проводили на зразках з крупнокристалічною (КК) і субмікрокристалічною (СМК) структурою.

Для дослідження впливу механічної обробки використовувались різні режими різання:  $v = 30 - 130$  м/хв,  $s = 0,2 \div 0,5$  мм / об. Використовувалася

постійна глибина різання  $t = 0,5$  мм. Процес різання здійснювався без охолодження.

В якості ріжучого інструменту використовувався токарний прохідний різець зі змінними багатогранними твердосплавними пластинами CNMG 120404-MF1, TS2000 фірми SECO. Геометричні параметри: передній кут –  $5^\circ$ , задній кут –  $0^\circ$ , радіус округлення вершини леза – 0,4 мм. Експерименти проводили на токарному верстаті моделі Н.Ernault-Somua Cholet 435.

Основними критеріями руйнування при визначені границь витривалості і побудові кривих втоми є повне руйнування або появі макротріщин заданого розміру. Випробування проводять на лабораторних зразках малого діаметра (7–10 мм), виготовлених з прутка. Поверхня зразків ретельно полірують [6].

Далі проводять серію випробувань зразків при вигині симетричним циклом навантаження (вигин симетричним циклом найбільш легко реалізувати). У першому випробуванні прикладають величину навантаження, яка створює максимальне напруження циклу, за значенням близькі до границі текучості. Заміряють кількість циклів навантаження, які зразок витримав до руйнування. Зменшують навантаження і проводять наступне випробування, заміряють кількість циклів навантаження, які зразок витримав до руйнування. І так поетапно навантаження знижують, поки зразок не витримає без руйнування базове число циклів навантаження ( $10^7$  циклів) [6].

Результати кожного випробування наносять на графік, де по осі абсцис (X) відкладають кількість циклів, яке витримав зразок, а по осі ординат (Y) – максимальні напруження циклу. Отримана крива називається кривою втоми (інші назви "крива Велера", "крива Напруга-Цикл"). Вона може будуватися в координатах  $\sigma$ -N (лінійні координати),  $\sigma$ -lgN (напівлогарифмічні координати), lg $\sigma$ -lgN (логарифмічні координати).

В якості критерію оцінки опору втоми використовується границя витривалості. Її значення для кожної сталі різні, з ними можна ознакомитись в довідкових посібниках і технічних характеристиках сталей.

Оцінка міцності вироби від дії циклічного навантаження зводиться до порівняння значень отриманих розрахункових напруг і значення границі витривалості сталі, з якої виріб виготовлений. Такий підхід не завжди коректний.

У довідковій літературі і технічних характеристиках сталі границя витривалості позначений як  $\sigma_{-1}$ . Саме позначення  $\sigma_{-1}$  говорить про те, що наведена величина нормального напруження, що виникає при симетричному циклі навантаження при випробуваннях, що проводять на лабораторних зразках малого діаметра (7–10 мм), виготовлених з прутка.

Отже, у виробах іншої конструкції, розмірів, і при інших випадках циклічного навантаження користуватися значенням  $\sigma_{-1}$  некоректно. На підставі вищевикладеного справедливо вважати, що межа витривалості не є достатнім критерієм для оцінки опірності металу.

Існує більш інформативний критерій, що характеризує опір металу до дії циклічних навантажень – діаграма граничних відхилень для різних асиметрій

циклу [6]. Побудова діаграма граничних відхилень для СМК сталі після механічної обробки з різними режимами різання буде розглянуто у цьому розділі.

На рис. 1 наведено експериментально отримані криві втоми для КК та СМК Сталі 20.

Як видно з рис. 1, крива асимптотична наближається до горизонтальної лінії. Ордината цієї асимптоти і є границя витривалості, тобто найбільше напруження циклу, при якому руйнування матеріалу ніколи не відбудеться.

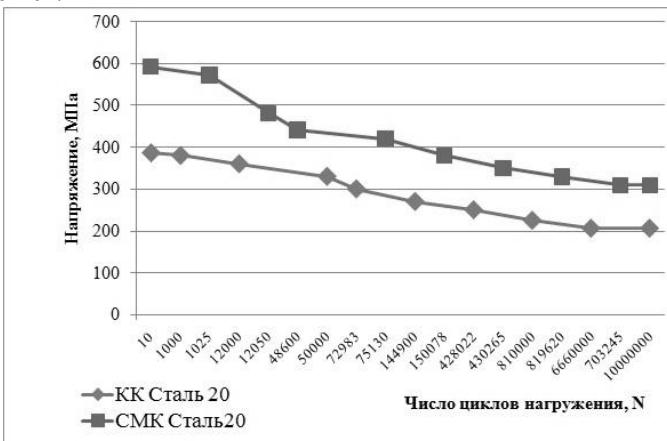


Рисунок 1 – Криві втоми Сталі 20 в лінійних координатах

Таким чином, запис  $\sigma_{-1} = 206$  МПа для Сталі 20 у крупнокристалічному стані означає, що це найбільше нормальнє напруження, при якому не зруйнується пруток малого діаметра зі шліфованою поверхнею при дії згинального напруження в симетричному циклі. З рисунка видно, що зразки сталі після ІПД мають великий запас витривалості. У межах  $10^3 - 10^7$  циклів запас витривалості вище на ~ 100МПа порівняно з матеріалом без субмікро структури. Найбільше значення границі витривалості матеріалу після ІПД порядку 700МПа при частоті циклів  $6 \cdot 10^4$ . Можна зробити висновок, що Сталь20 з субмікрокристалічною структурою в діапазоні  $10^3 - 10^7$  циклів навантаження має підвищеними характеристиками міцності.

Аналогічно були побудовані криві втоми для СМК Сталі 20 після її обробки із різними режимами різання (рис. 2).

Отримані результати показали, що механічна обробка негативно впливає на границю витривалості сталі з СМК структурою. Умови обробки, що мають низькі величини подачі та швидкості різання дозволяють зберегти значення границі витривалості на високому рівні у порівнянні із механічною обробкою зі швидкістю 130 м/хв та подачею 0,5 мм/об.

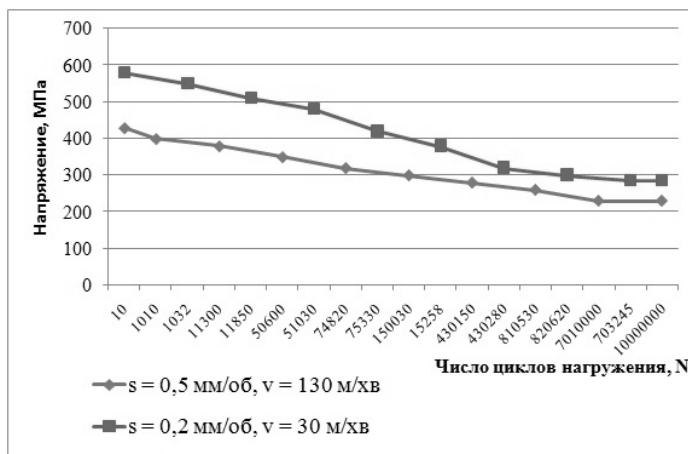


Рисунок 2 – Крива втоми Сталі 20 з СМК структурою після механічної обробки

Однак отримані данні коректні лише для зразків малих діаметрів та при симетричному навантаженні. Для дослідження інших випадків циклічного навантаження та у виробах іншої конструкції та розмірів буде побудовано діаграма граничних відхилень.

Для побудови діаграми граничних напружень в якості деталі обраний важіль приводного пристрою візка вагона метро (рис. 3). Ця деталь передає тягове навантаження від візка на кузов вагона і в процесі експлуатації підлягає наступним циклічним навантаженням: розтягнення–стиснення і вигин.

У даній статті буде розглянуто циклічне згиальне навантаження. Для отримання значень, необхідних для побудови діаграми використаний ППП ANSYS Workbench [7].

1. На першому етапі проведений втомні випробування важеля і побудована крива втомної міцності.

2. У ППП ANSYS Workbench створюємо матеріал з необхідними властивостями.

Для завдання матеріалу необхідно задати щільність, модуль пружності і коефіцієнт Пуассона. Значення щільності й інших параметрів для крупнокристалічної сталі беремо з довідкової літератури [8], для субмікрокристалічних зразків з роботи [9]. Температуру, якій відповідає ця щільність, вказувати необов'язково. Модуль **Engineering Data** розуміє завдання будь-якого параметра у вигляді таблиці і ілюструє у вигляді графіка. Якщо значення тільки одне, на графіку відображається одна точка.

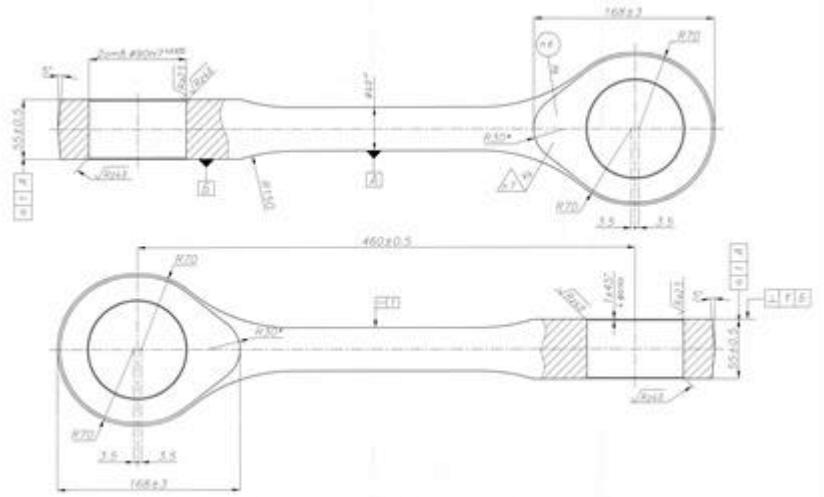


Рисунок 3 – Важіль приводного пристрою

Наступну властивість додаємо з набору опцій **Linear Elastic** (Лінійні пружні). Сталь ізотропна, тому вибираємо властивість **Isotropic Elasticity** (ізотропна пружність). Необхідно заповнити наступні поля: модуль Юнга (**Young's Modulus**) і коефіцієнт Пуассона (**Poisson's Ratio**). Поля **Bulk Modulus** і **Shear Modulus** заповняться автоматично.

Остання опція необхідна саме для втомних розрахунків. Це **Alternating Stress Mean Stress** з набору опцій **Life**.

На цьому етапі задаємо криву втоми. У вікні **Table of Properties Row 9: Alternating Stress Mean Stress** вводимо значення з рис. 1 та рис. 2 даної роботи. В стовпці **B** цикли, в стовпці **C** напруги, їм відповідні. У стовпці **A** вказується середня напруга циклу для отриманої експериментально кривої втоми. Як вже вказували раніше, криву втоми отримували для симетричного циклу навантаження, тобто  $\sigma_m = 0$ . Для нашого завдання заведено досить властивостей.

3. Розрахунки в ANSYS проводяться методом скінчених елементів. Так що далі необхідно згенерувати сітку скінчених елементів на моделі. Для цього натискаємо правою кнопкою миші на об'єкті **Mesh**, з контекстного меню вибираємо **Insert - Sizing**. Необхідно вказати розмір кінцевого елемента. У вікні **Details** натискаємо на клітинку поруч з **Element size** і вказуємо розмір елемента 5 мм. в контекстному меню вибираємо **Generate Mesh**. Після генерації модель буде виглядати так.

4. Тепер необхідно накласти закріплення та навантаження.

Деталь жорстко закріплена за одну провушину. Цю схему закріплення реалізуємо за допомогою команди **Fixed Support**. Для цього натискаємо

правою кнопкою миші на об'єкті **Static structural**, з контекстного меню вибираємо **Insert - Fixed Support**.

5. Запускаємо розрахунок. Після завершення роботи вибираємо вид результату. Нас цікавлять загальні напруги, які виникають в конструкції. Для цього правою кнопкою натискаємо на об'єкті **Solution** і в контекстному меню вибираємо **Stress - Equivalent**.

Отримані напруги близькі до межі витривалості даної сталі (206МПа).

6. Переходимо до отримання даних для побудови діаграми граничних напружень. Вона буде побудована по серії точок. Перша точка - це межа витривалості сталі при симетричному циклі навантаження. Отже вона матиме на графіку координати  $(0; \sigma_{-1})$ . Остання точка діаграми - межа міцності, вона матиме координати  $(\sigma_B; \sigma_B)$ . Нам необхідно отримати точки між ними. Це будуть межі витривалості для циклів навантаження з коефіцієнтами асиметрії від -1 до +1.

Для отримання меж витривалості необхідно повторити розрахунок з різними величинами навантаження. Щоб заощадити час скористаємося інструментом **Solution Combination**. Для цього натискаємо правою кнопкою на об'єкті **Model** і в контекстному меню вибираємо **Insert-Solution Combination**.

У стовпці **Coefficient** знаходиться масштабний коефіцієнт. На нього множиться значення результату, отриманого в розрахунку. Такий метод розрахунку дає ті ж результати, що і зміна значення навантаження, але займає значно менше часу. Решта точок можна отримати аналогічно.

В результаті розрахунків отримано ряд точок за якими будуються діаграми граничних напружень (рис. 4).

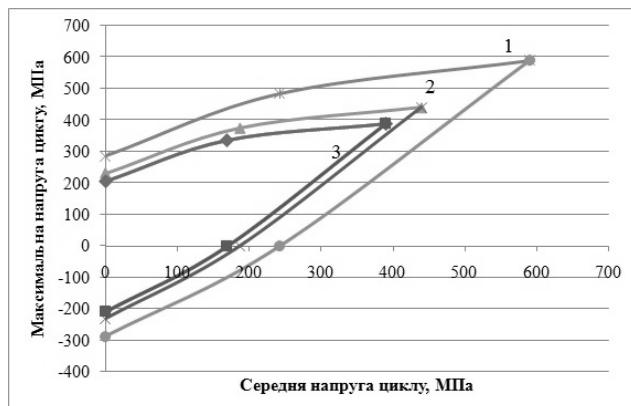


Рисунок 4 – Діаграми граничних напружень:

1 – для субмікрокристалічного зразка з режимами обробки ( $s=0,2\text{мм}/\text{об}$ ,  $v=30\text{м}/\text{мин}$ );  
2 – для субмікрокристалічного зразка з режимами обробки ( $s=0,5\text{мм}/\text{об}$ ,  $v=130\text{м}/\text{мин}$ );  
3 – для крупнокристалічного зразка

Діаграми граничних напружень будуться в координатах середньої напруження циклу (вісь X) і максимального напруження циклу (вісь Y) і дозволяє виконати оцінку опору втомі майбутнього виробу на етапі проектування. Достатньо знати такі характеристики циклу: середнє напруження циклу  $\sigma_m$  і найбільше напруження циклу  $\sigma_{max}$ .

Оцінка опору втомі виконується таким чином: на діаграмі будуться точка, координатами якої є середнє і максимальне напруження циклу. Якщо точка опиниться в області, обмеженої кривими  $\sigma_{max}$  і  $\sigma_{min}$ , то втомного руйнування майбутнього виробу протягом встановленого терміну служби не відбудеться.

Для крупнокристалічного зразка маємо наступні точки: точка 1 – з координатами (0; 206,99), точка 2 – (168,7; 337,4), точка 3 – (390; 390), точка 4 – (0;-206,99), точка 5 – (168,7; 0). Для субмікрокристалічного зразка з режимами обробки ( $s=0,2\text{мм}/\text{об}, v=30\text{м}/\text{мин}$ ): точка 1 – з координатами (0; 286,98), точка 2 – (242,5; 485), точка 3 – (590; 590), точка 4 – (0; -286,98), точка 5 – (242,5; 0). Для субмікрокристалічного зразка з режимами обробки ( $s=0,5\text{мм}/\text{об}, v=130\text{м}/\text{мин}$ ): точка 1 – з координатами (0; 231,28), точка 2 – (187,34; 374,67), точка 3 – (440; 440), точка 4 – (0; -231,28), точка 5 – (187,34; 0).

Дана діаграма дозволяє робити оцінку опору втомі для циклів з різними коефіцієнтами асиметрії, тобто вона охоплює всі розглянуті раніше види циклів навантаження. Враховуючи те, що конфігурація і розміри роблять значний вплив на опір втоми, в даній роботі пропонується одержати діаграму граничних напружень на типовій деталі. Отримана діаграма допоможе проводити оцінку опору втомі при проектуванні виробів подібної конструкції і розмірів.

Порівняння отриманих діаграм для різної структури Сталі 20 показало значне зростання максимального навантаження та середнього навантаження циклу яке може витримати Сталь 20 у субмікрокристалічному стані після механічної обробки з низькими режимами різання. Таким чином субмікроствруктурою низьковуглецевою сталлю можливо замінити більш дорогі леговані сталі та виготовляти більш відповідальні деталі машин.

### Висновки:

Експериментально отримано криві втоми для крупнокристалічного зразка Сталі 20 та для Сталі 20 у субмікрокристалічному стані. Результати показали, що Сталь20 з субмікрокристалічною структурою в діапазоні  $10^3$  -  $10^7$  циклів навантаження має підвищенні характеристиками міцності. Механічна обробка негативно впливає на границю витривалості сталі з СМК структурою. Умови обробки, що мають низькі величини подачі та швидкості різання дозволяють зберегти значення границі витривалості на високому рівні у порівнянні із механічною обробкою зі швидкістю 130 м/хв та подачею 0,5 мм/об.

Створено алгоритм побудови діаграми граничних напружень у ППП ANSYS Workbench. Дано діаграма дозволяє робити оцінку опору втомі для циклів з різними коефіцієнтами асиметрії, тобто вона охоплює симетричний, пульсуєчий та асиметричний цикли, що є найпоширенішими навантаженнями у машинобудуванні.

**Список використаних джерел:** 1. Валиев Р.З. Наноструктурные материалы, полученные методом интенсивной пластической деформации / Р.З. Валиев, И.В. Александров. – М.: Логос, 2000. – 272 с. 2. Verezub N.V. The management of surface quality of metal with nano and submicrocrystalline structure during machining / N.V. Verezub, G. Kaptay, A.A. Symonova // Сучасні технології в машинобудуванні = Modern technologies in mechanical engineering : зб. наук. пр. – Харків : НТУ "ХПІ", 2010. – Вип. 5. – С. 244-249. 3. Грабченко А.И. Резание металлов с объемнойnano- и субмикрокристаллической структурой: монография / А.И. Грабченко, Дж. Каптай, А.А. Симонова і др. – Х.: «Точка», 2012. – 217с. 4. Терентьев В.Ф. Циклическая прочность субмикро- и нанокристаллических металлов и сплавов / В.Ф. Терентьев // Нові матеріали та технології в металургії та машинобудуванні, 2010. – №1. – С. 9-24. 5. Юркова А.И. Механические свойства наноструктурного железа, полученного интенсивной пластической деформацией / А.И. Юркова, А.В. Белоцкий, А.В. Бякова, Ю.В. Мильман // Наносистеми, наноматериалы, нанотехнологии: зборник научных праць, 2009. – Т.7, вып.2. – С. 619-632. 6. Серенсен С.В. Несущая способность и расчет деталей машин на прочность / С.В. Серенсен, В.П. Когаев, Р.М. Шнейдерович. – М.: Машиностроение, 1985. – 488с. 7. ANSYS в примерах и задачах / Под общ. ред. Д.Г. Красковского. – М.: КомпьютерПресс, 2002. – 224с. 8. Марочник сталей и сплавов / Под общ. ред. А.С. Зубченко. – М.: Машиностроение, 2003. – 784с. 9. Скороход В.В. Физико-хімічна кінетика наноструктурних системах / В.В. Скороход, І.В. Уварова, А.В. Рагуля. – К.: Академперіодика, 2001. – 180с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Valiev R.Z. Nanostrukturyie materialy, poluchennye metodom intensivnoy plasticheskoy deformatsiyey / R.Z. Valiev, I.V. Aleksandrov. – M.: Logos, 2000. – 272 s. 2. Verezub N.V. The management of surface quality of metal with nano and submicrocrystalline structure during machining / N.V. Verezub, G. Kaptay, A.A. Symonova // Suchasni texnologiyi v mashynobuduvanni: zb. nauk. pracz'. – Xarkiv: NTU «ХПІ», 2011. – vy'p.6. – S. 40-51. 3. Grabchenko A.I. Rezanie metallov s ob'emonnoy nano- i submikrokristallicheskoy strukturoy: monografiya / A.I. Grabchenko, J. Kaptay, A.A. Symonova i dr. – H.: «Tochka», 2012. – 217s. 4. Terentev V.F. Tsiklicheskaya prochnost submikro- i nanokristallicheskikh metallov i splavov / V.F. Terentev // Novi materiali ta tehnologii v metalurgii ta mashinobuduvanni, 2010. – №1. – S. 9-24. 5. Yurkova A.I. Mekanicheskie svoystva nanostrukturnogo zheleza, poluchenogo intensivnoy plasticheskoy deformatsiyey / A.I. Yurkova, A.V. Belotskiy, A.V. Byakova, Yu.V. Milman // Nanosistemi, nanomateriali, nanotehnologii: zbirniki naukovih prats., 2009. – T.7, vyip.2. – S. 619-632. 6. Serensen S.V. Nesuschaya sposobnost i raschet detaley mashin na prochnost / S.V. Serensen, V.P. Kogaev, R.M. Shneyderovich. – M.: Mashinostroenie, 1985. – 488s. 7. ANSYS v primerah i zadachah / Pod obsch. red. D.G. Kraskovskogo. – M.: KompyuterPress, 2002. – 224 s. 8. Marochnik staley i splavov / Pod obsch. red. A.S.Zubchenko. – M.: Mashinostroenie, 2003. – 784 s. 9. Skorohod V.V. Fiziko-himichna klnetika v nanostrukturih sistemah / V.V. Skorohod, I.V. Uvarova, A.V. Ragulya. – K.: Akademperiodika, 2001. – 180 s.

А.М. Сліпчук, канд. техн. наук, Львів,  
Р.С. Яким, д-р техн. наук, Дрогобич, Україна

## ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ ТЕХНОЛОГІЇ ПРОЦЕСУ ЗАПРЕСОВУВАННЯ ЗУБКІВ У ШАРОШКИ БУРОВИХ ДОЛІТ

Аналізом характеру пошкоджень поверхонь отворів виявлені сліди від дії сил стиску що виникають вздовж осі зубка при втисненні його в породу вибою. Також виявлено сліди деформації від дії згину на зубок залежно від орієнтації його ковзання по вибою. Фіксували її притирання, фреттинг-корозію, пошкодження локальних ділянок стінок отворів спричинені прокручуванням зубка навколо своєї осі в отворі вінця шарошки. У випадку застосування зубків із симетричним загостренням породоруйнівної частини ефективним виявляється орієнтація твірної вражуючої головки зубка під дійсним кутом до осі вінця шарошки. Розрахунки показують, що оптимальним є такий кут рівний  $45^\circ$ .

**Ключові слова:** запресовування зубків, бурові долота

Анализом характера повреждений поверхностей отверстий обнаружены следы от действия сил сжатия возникающих вдоль оси зубка при нажатии его в породу забоя. Также обнаружены следы деформации от действия сгиба на зубок зависимости от ориентации его скольжения по забою. Фиксировали и притирание, фреттинг-коррозию, повреждения локальных участков стенок отверстий вызванные прокруткой зубка вокруг своей оси в отверстии венца шарошки. В случае применения зубков с симметричным обострением породоразрушающей части эфективным оказывается ориентация образующей впечатляющей головки зубка под некоторым углом к оси венца шарошки. Расчеты показывают, что оптимальным является такой угол равен  $45^\circ$ .

**Ключевые слова:** запрессовка зубков, буровые долота

*The analysis of the nature of the damage to the surfaces of the openings revealed traces of the action of the compressive forces arising along the axis of the tungsten carbide inset cutter when squeezing it into the rock face. Also found traces of deformation from the action of bending to the tungsten carbide inset cutter, depending on the orientation of its slip on the face. Fixing and rubbing, fretting-corrosion, damage to the local areas of the walls of the holes caused by scrolling the tungsten carbide inset cutter around its axis in the opening of the rolling-cutter teeth row. In the case of the use of tungsten carbide inset cutter with symmetrical exacerbation of the breeding part, the orientation of the creature's impressive head of the tungsten carbide inset cutter is determined by an effective angle to the axis of the crown of the tungsten carbide inset cutter pick. Calculations show that an angle of  $45^\circ$  is optimal.*

**Keywords:** crimping of teeth, drill bits

**Постановка проблеми.** Тришарошкові бурові долота з твердосплавним вставним породоруйнівним оснащенням знайшли широке застосування при спорудженні свердловин різного призначення [1]. Виготовлення таких доліт ставить перед долотобудуванням комплекс вимог щодо вибору сталей для шарошок доліт, параметрів насичення вуглецем та термообробки, технологічних операцій формоутворення отворів та складання з єднання

„зубок-шарошка”. Вставне породоруйнівне оснащення експлуатується в складних умовах і часто виходить з ладу через недосконалість конструкції й технології виготовлення доліт. Тому дослідження шляхів підвищення якості вставного породоруйнівного оснащення на етапах створення доліт є актуальним і актуальним завданням долото будування [2].

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** У міру повороту шарошки навколо осі зубка, що заглибився вражуючою частиною в породу, відбуваються деформації та руйнування породи вибою. При входженні в породу вражуючої частини наступного зубка відбувається вивертання сколеної породи попереднім зубком [3].

Аналізом характеру відпрацювання та втрати працездатності вставного породоруйнівного оснащення встановлено факти розхитування, прокручування зубків навколо власної осі й зміна орієнтації їхньої вражуючої частини, виламування та випадання твердосплавних зубків.

Миттєве навантаження на зубки шарошки може сягати 80 – 85 % усього навантаження на долото [4].

Процес шарошкового буріння – руйнування подрібнювально-склювальною дією на породу вибою.

Відбувається ковзання оснащення шарошок по поверхні вибою в радіальному й тангенціальному напрямку.

„Security DBS Dresser Industries Inc.” розроблено долото у якого зрівноважено діючі зусилля й збалансованим розсіюванням навантаження [5]. В конструкції реалізовано ефект оптимальної орієнтації породоруйнівного оснащення й забезпечення умов що попереджують утворення гребенів на вибої.

Руйнування породи вибою твердосплавними зубками спричинює складний напружений стан тіла зубка та тіл вінців шарошки. Породоруйнівне оснащення шарошок на основі твердосплавних зубків із загостrenoю вражуючою частиною зазнає дії згинальних та крутних навантажень.



Рисунок 1 – Загальний вигляд вставного породоруйнівного оснащення відпрацьованого тришарошкового бурового долота

Крутний момент відносно осі зубка виникає через характер руху шарошок, що спричинює постійну зміну орієнтації передньої площини вражуючої частини вставного зубка. Це дає найкращий ефект в руйнуванні породи вибою.

При обертанні шарошки породоруйнівні зуби, що проникли вражуючою частиною у породу вибою, зазнають поздовжні та поперечні навантаження. Навантажений зубок здійснює відносно своєї твірної поздовжній поперечні ковзання. Сили реакції вибою спричиняють складний напружений стан вражуючої та вихідної з тіла вінця частини зубка. Різні точки контакту зубків з породою здійснюють нерівномірне ковзання. Сили тертя-сколювання сприяють виникненню моменту скручування зубка.

Проникнення вражуючої частини твердосплавного зубка в породу, а також обертальний рух шарошки по вибою спричинює виникнення (рис. 2): дотичних та згидаючих й стискаючих напруженень. Це різко знижує міцність з'єднання „зубок-шарошка”.

У місці контакту спряжених поверхонь виникають мікроковзання, мікродеформації та мікроруйнування.

**Формулювання цілі статті.** Аналізом характеру пошкоджень поверхонь отворів виявлені сліди від дії сил стиску що виникають вздовж осі зубка при втисненні його в породу вибою. Також виявлено сліди деформації від дії згину на зубок залежно від орієнтації його ковзання по вибою. Фіксували й притирання, фреттинг-корозію, пошкодження локальних ділянок стінок отворів спричинені прокручуванням зубка навколо своєї осі в отворі вінця шарошки.

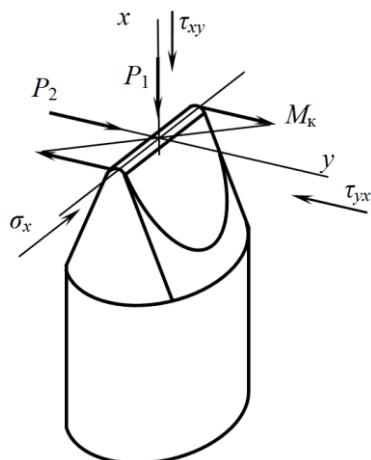


Рисунок 2 – Характер дії напруженень на вершині твердосплавного зубка

Аналізом характеру пошкоджень породоруйнівного оснащення шарошок виявлено що зі збільшенням величини осьового навантаження на долото збільшуються випадки розколювання, руйнування твердосплавних зубків.

**Виклад основного матеріалу.** Для аналізу характеру напружень що виникають в твердосплавному зубку скористаємося теорією пружності [9] й досягненнями в області механіки матеріалів [6]. За умов орієнтації вражуючої частини твердосплавного зубка вздовж твірної, між діючими напруженнями мають існувати такі напруження:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

У випадку дії по довільній площині деякого дотичного напруження, то по перпендикулярній до неї площині обов'язково діятиме дотичне напруження, рівне за величиною і протилежне за знаком [6]. Відповідно до гіпотези плоских перерізів механіки матеріалів матимемо такі розрахункові формулі:

$$\begin{cases} \sigma_x = -\frac{P_1}{2xd_3} + \frac{P_2y(x-r_0)}{2x^3d_3} \\ \sigma_y = 0 \\ \tau_{xy} = \tau_{yx} = \frac{3P_2(x^2-y^2)}{4x^3d_3} \end{cases} \quad (2)$$

де  $d_3$  – діаметр вставного твердосплавного породоруйнівного зубка,

$r_0$  – радіус заокруглення вражуючої частини вставного твердосплавного зубка,

$P_1$  – поздовжня сила що діє на уражуючу частину зубка,

$P_2$  – поперечна сила що діє на уражуючу частину зубка.

Взявши за основу  $\sigma_x$  розв'яжемо системи рівнянь (1) і (2).

Оскільки

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = -\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} \quad (3)$$

маємо:

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = -\frac{P_1}{2x^2 d_3} + \frac{3P_2 y \left(2 - \frac{3}{x} r_0\right)}{2x^3 d_3}. \quad (4)$$

Інтегруючи,

$$\tau_{xy} = -\int \frac{P_1}{2x^2 d_3} dy + \int \frac{3P_2 \left(2 - \frac{3}{x} r_0\right)}{2x^3 d_3} y dy. \quad (5)$$

отримаємо

$$\tau_{xy} = -\frac{P_1}{2x^2 d_3} y + \frac{3P_2 \left(2 - \frac{3}{x} r_0\right)}{4x^3 d_3} y^2 + C. \quad (6)$$

де  $C = C_1 + C_2$  – деяка функція інтегрування.

Припустимо, що по гранях відбувається ідеальне ковзання, тобто  $x = y$

і  $\tau_{xy} = \sigma_x$ , тоді

$$-\frac{P_1}{2xd_3} + \frac{P_2 x(x - r_0)}{2x^3 d_3} = -\frac{P_1}{2x^2 d_3} x + \frac{3P_2 \left(2 - \frac{3}{x} r_0\right)}{4x^3 d_3} x^2 + C \quad (7)$$

Отже,

$$C = \frac{3P_2 r_0}{4x^2 d_3}. \quad (8)$$

Розрахункова формула для дотичних напружень матиме вигляд

$$\tau_{xy} = -\frac{P_1}{2x^2 d_3} y + \frac{3P_2 r_0}{4x^2 d_3} + \frac{3P_2 \left(2 - \frac{3}{x} r_0\right)}{4x^3 d_3}. \quad (9)$$

Оскільки

$$\frac{\partial \sigma_y}{\partial y} = -\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} \quad (10)$$

$$\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} = -\frac{P_1}{x^3 d_3} y + \frac{3P_2 r_0}{2x^3 d_3} + \frac{9P_2 \left(1 - \frac{2}{x} r_0\right)}{2x^4 d_3} y^2. \quad (11)$$

$$\sigma_y = - \int \frac{P_1}{x^3 d_3} y dy + \frac{3}{2} \int \frac{P_2 r_0}{x^3 d_3} dy + \frac{9}{2} \int \frac{P_2 \left(1 - \frac{2}{x} r_0\right)}{x^4 d_3} y^2 dy. \quad (12)$$

$$\sigma_y = - \frac{P_1}{2x^3 d_3} y^2 + \frac{3P_2 r_0}{2x^3 d_3} y + \frac{3P_2 \left(1 - \frac{2}{x} r_0\right)}{2x^4 d_3} y + C_3. \quad (13)$$

Приймаючи аналогічні вище прийнятим допущення, і прирівнюючи ліві частини рівнянь (9) і (13), отримаємо  $C_3 = 0$ .

Тепер розрахункова формула для  $\sigma_y$  матиме вигляд

$$\sigma_y = - \frac{y}{2x^3 d_3} \left( -P_1 y + 3P_2 \left( r_0 + \frac{y^2}{x} \left( 1 - \frac{2}{x} r_0 \right) \right) \right). \quad (14)$$

Результатуєше розрахункове напруження розраховується згідно енергетичної теорії міцності:

$$\sigma_p = \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2}. \quad (15)$$

При проникненні породоруйнівної частини зубка в породу вибою концентрація напружень головно локалізується у вершині поверхні зубка. Це зумовлює розробку широкої гами конструкцій вражуючої частини породоруйнівних зубків. Зокрема, „Hughes Christensen Co.” розроблено зубки з односторонньою вибіркою [7].

У випадку застосування зубків із симетричним загостренням породоруйнівної частини ефективним виявляється орієнтація твірної вражуючої головки зубка під деяким кутом до осі вінця шарошки. Розрахунки показують, що оптимальним є такий кут рівний  $45^\circ$ . Відпрацювання бурових доліт з такою конструкцією породоруйнівного оснащення виявило підвищення ефективності руйнування породи вибою, що позитивно вплинуло на показники прохідки долота.

Для забезпечення надійності з'єднання „хвостовик зубка – отвір шарошки” від прокручування встановимо умову для встановлення граничної величини натягу у з'єднанні.

При посадці зубка виникає контактний тиск  $p$  який відповідна йому сила тертя, яка припадає на елементарну площинку  $ds = rh d\varphi$  рівна

$$dp = p_0 rh f d\varphi.$$

де  $r$  – радіус хвостовика вставного зубка,

$h$  – висота хвостовика вставного зубка, що спряжений з поверхнею отвору в шарошці,

$f$  – коефіцієнт тертя в спряжені контактуючих поверхонь з'єднання.

Момент цієї сили відносно осі симетрії зубка  $dM_t = p_0 r^2 h f d\varphi$ .

Інтегруючи цей вираз отримаємо вираз для визначення моменту сил тертя

$$dM_t = p_0 r^2 h f \int_0^{2\pi} d\varphi = p_0 r^2 h f 2\pi.$$

Для уникнення прокручування необхідно щоб задовольнялася умова  $M_t > M_k$ . Тепер маємо

$$M_k < 2\pi p_0 h f r^2.$$

Необхідний тиск між спряженими поверхнями хвостовика зубка й отвору в шарошці

$$p_0 = \frac{M_k}{2\pi h f r^2}.$$

З іншої сторони, скориставшись формулами Ляме [6]

$$p_0 = \frac{\Delta E}{(A + B)d},$$

де  $\Delta$  – натяг у з'єднанні,

$E$  – модуль пружності

$d$  – діаметр хвостовика зубка

$$A + B = \frac{0,5b^2}{0,25b^2 - r^2},$$

$b$  – товщина вінця шарошки в якій виконані отвори під посадку зубків.  
Отже, величина натягу у з'єднанні повинна задовольняти умову

$$\Delta \geq \frac{0,5M_k b^2}{\pi E h f (0,25b^2 - r^2) r}.$$

Виходячи з даних поданих в [8] розглянемо умови для забезпечення надійності з'єднання „хвостовик зубка – отвір шарошки” від згидаючого моменту на зубку.

При навантаженні з'єднання згидальним моментом  $M$  на рівномірну епюру тисків від посадки накладається епюра тисків, характерна для згину.

При цьому  $0,5M$  припадає уражуючу частину зубка, така ж величина моменту припадає на протилежну сторону основи хвостовика зубка.

Виходячи з класичних підходів матимемо тиск

$$p_1 = \frac{4}{\pi} \frac{M}{2W} = \frac{12M}{\pi dh^2} \leq p$$

де  $\frac{4}{\pi}$  – множник, що враховує характер епюри тисків по колу хвостовика вставного зубка

$W = \frac{dh^2}{6}$  – момент опору згину перерізу хвостовика.

Значення допустимого моменту для забезпечення надійності з'єднання „хвостовик зубка – отвір шарошки” можна прийняти

$$M = 0,2pdh^2,$$

При цьому покладемо  $p_1 = 0,75p$ .

**Висновки.** Допустимий момент пропорційний квадрату висоти, тому з'єднання що піддаються значним згинаючим моментам не можна виконувати з малими значеннями діаметра й висоти хвостовика зубка.

У подальшому практичний інтерес є у необхідності моделювання варіантів розподілу напружень (контактних тисків) при різних показниках шорсткості спряжених деталей, а також варіантів розподілу напружень (контактних тисків) у вінці шарошки при різних відстанях один від одного твердосплавних зубів.

**Список використаних джерел:** 1. Неупокоев В. Г. Вопросы теории и практики проектирования, производства и эксплуатации буровых шарошечных долот / Неупокоев В. Г. – Самара: Издательство Самарского научного центра Российской академии наук, 2000. – 376 с. 2. Морозов Л.В. Повышение долговечности буровых долот на основе компьютерного анализа элементов конструкций и их сборки: дис. ... кандидата техн. наук: спец. 05.02.08 / Морозов Леонид Владимирович. – Самара, 2003. – 180 с. 3. Яким Р.С. Науково-прикладні засади підвищення довговічності тришарових бурових доліт: дис. ... доктора техн. наук: 05.05.12 / Яким Роман Степанович. – Івано-Франківськ, 2012. – 293 с. 4. Яким Р.С. Підвищення якісних показників вставного породоруйнівного оснащення шарошок тришарових бурових доліт / Р.С. Яким, Ю.Д. Петрина, І.С. Яким // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2013. – № 3 (48). – С. 127-138. 5. Лорд Р. Новые достижения в технологии производства буровых долот / Лорд Р. // Нефтегазовые технологии. – 2006. – № 3. – С. 44-49. 6. Писаренко Г. С. Опір матеріалів. / Писаренко Г. С., Квітка О. Л., Уманський Є. С. – [2-е вид., доп. і переробл.]. – К.: Вища школа, 2004. – 655 с. 7. Синев С. В. Разрушение горных пород вооружением шарошечного долота / Синев С. В. // Наука в нефтяной и газовой промышленности. – 2010. – № 1. – С. 8-12. 8. Решетов Д. Н. Детали машин / Решетов Д. Н. – [4-е изд., перераб. и доп.] – М.: Машиностроение, 1989. – 496 с. 9. Тимошенко С. П. Теория упругости / Тимошенко С.П., Гудьєр Дж.; пер с англ. под. ред. Шапира Г.С. – [2-е изд.]. – М.: Наука. Главная редакция фізико-математической литературы, 1979. – 560 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. *Neupokoev V.G.* Voprosy teorii i praktiki proektirovaniya, proizvodstva i jeksploatacii burovyh sharoshechnyh dolot / Neupokoev V. G. – Samara: Izdatel'stvo Samarskogo nauchnogo centra Rossijjskoj akademii nauk, 2000. – 376 s. 2. *Morozov L.V.* Povyshenie dolgovechnosti burovyh dolot na osnove kompjuternogo analiza jelementov konstrukcij i ih sborki: dis. ... kandidata tehn. nauk: spec. 05.02.08 / Morozov Leonid Vladimirovich. – Samara, 2003. – 180 s. 3. *Jakim R. S.* Naukovo-prikladni zasadi pidvishhennja diovovichnosti trisharoshkovih burovih dolit: dis. ... doktora tehn. nauk: 05.05.12 / Jakim Roman Stepanovich. – Ivano-Frankiv'sk, 2012. – 293 s. 4. *Jakim R.S.* Pidvishhennja jakisnih pokaznikiv vstavnogo porodorujnivnogo osnashhennja sharoshok trisharoshkovih burovih dolit / R. S. Jakim, Ju. D. Petrina, I. S. Jakim // Rozvidka ta rozrobka naftovih i gazovih rodovishh. – 2013. – № 3 (48). – S. 127-138. 5. *Lord R.* Novye dostizhenija v tehnologii proizvodstva burovyh dolot / Lord R. // Neftegazovye tehnologii. – 2006. – № 3. – S. 44-49. 6. *Pisarenko G. S.* Opis materialiv. / Pisarenko G. S., Kvitska O. L., Umans'kij E. S. – [2-e vid., dop. i pererobl.]. – K.: Vishha shkola, 2004. – 655 s. 7. *Sinev S. V.* Razrushenie gornyh porod vooruzhieniem sharoshechnogo dolota / Sinev S. V. // Nauka v neftjanoy i gazovoy promyshlennosti. – 2010. – № 1. – S. 8-12. 8. *Reshetov D. N.* Detali mashin / Reshetov D. N. – [4-e izd., pererab. i dop.] – M.: Mashinostroenie, 1989. – 496 s. 9. *Timoshenko S. P.* Teoriya uprugosti / Timoshenko S. P., Gud'er Dzh.; per s angl. pod. red. Shapira G. S. – [2-e izd.]. – M.: Nauka. Glavnaja redakcija fiziko-matematicheskoy literatury, 1979. – 560 s.

УДК 004.942:624.073.12

А.Л. Становский, д-р техн. наук, Е.А. Науменко,  
Абу Шена Осама, Одесса, Украина

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ В САПР РАВНОНАПРЯЖЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Встановлено, що у корпусах апаратів, працюючих під тиском, найбільш слабким елементом є плоске днище, у зв'язку з чим доводиться збільшувати його товщину в 3 – 5 разів у порівнянні з товщиною стінки. Запропоновано метод проектування рівнонапруженних вузлів циліндрических резервуарів, що містять плоскі круглі пластини змінної товщини, форма діаметральних перерізів яких моделюється рівнянням Гаусса. Метод випробуваний у реальному проектуванні з позитивним техніко-економічним ефектом.

**Ключові слова:** метод проектування, циліндричні резервуари

Установлено, что в корпусах аппаратов, работающих под давлением, наиболее слабым элементом является плоское днище, в связи с чем приходится увеличивать его толщину в 3 – 5 раз по сравнению с толщиной стенки. Предложен метод проектирования равнонапряженных узлов цилиндрических резервуаров, содержащих плоские круглые пластины переменной толщины, форма диаметральных сечений которых моделируется уравнением Гаусса. Метод испытан в реальном проектировании с положительным технико-экономическим эффектом.

**Ключевые слова:** метод проектирования, цилиндрические резервуары

*It is established that in the casing of the apparatus, pressure of the weakest element is the flat bottom, therefore it is necessary to increase its thickness in 3-5 times in comparison with the wall thickness. The proposed design method is equally stressed nodes of cylindrical tanks comprising a flat circular plate of variable thickness, the shape of the diametrical sections which is modeled by the equation of Gauss. The method is tested in real design with a positive technical and economic effect.*

**Keywords:** design method, cylindrical tanks

### Постановка проблемы и ее связь с важнейшими научно-практическими заданиями

В процессе создания новых деталей машин проектировщик должен всегда стремиться к максимальной эффективности проекта. Одним из составляющих такой эффективности является требование равнонапряженности деталей, обеспечивающее максимальное значение отношения «сопротивление/масса» и, соответственно, минимальную материалоемкость изделия в целом.

К сожалению, добиться полного равенства напряжений во всех точках детали невозможно даже для статической задачи. Это объясняется различным влиянием нагружения на отдельные элементы деталей сложной формы, неоднородностью их материала и другими конструктивными и технологическими особенностями.

Поэтому любая попытка проектирования равнонапряженных деталей будет лишь способом приблизиться к максимуму эффективности. Известно, что, например, в корпусах аппаратов, работающих под давлением, наиболее слабым элементом является плоское днище, в связи с чем приходится увеличивать его толщину в 3 – 5 раз по сравнению с толщиной стенки. Настоящая статья представляет собой попытку решить эту проблему за счет варьирования одной из основных конструктивных характеристик – толщины плоского днища резервуара, нагруженного внутренним давлением.

### Анализ последних исследований и публикаций

Большинство машиностроительных деталей и узлов содержат технологические полости и отверстия, непосредственно не необходимые для выполнения этими деталями своих функциональных «обязанностей» и придающие этим деталям причудливые, зачастую нетехнологичные формы. Конструкторы, например, зачастую интуитивно заменяют в объектах проектирования круглый сплошной прокат на трубу, круглую трубу на эллиптическую, удаляют часть «тела» зубчатых колес, конструкционных панелей и многое другое [1].

Наиболее ярко это проявляется в деталях, предназначенных для объектов транспорта: сложные формы деталей фюзеляжа самолетов и ракет [2], кузовов автомобилей [3]. От правильно рассчитанной формы зависит надежность ответственных деталей – лопаток турбин [4] и многое другое. Цель такого усложнения – получить равнонаруженную деталь или узел, что, как известно [5, 6], позволяет получить наиболее благоприятное соотношение масса детали / ее НДС.

Еще одним примером таких конструкций являются сосуды, работающие под давлением, их корпуса и днища [7]. Наиболее распространенными элементами существующих корпусных конструкций сосудов являются пластины и оболочки постоянной толщины. В большинстве случаев поля возникающих в них напряжений являются существенно неоднородными [8]. Следовательно, практически невозможна минимизация массы корпусных конструкций без использования в них элементов переменной толщины. В некоторых случаях находят паллиативное решение этой проблемы, например, стенки крупных вертикальных цилиндрических резервуаров для хранения нефтепродуктов изготавливают со ступенчато изменяющейся толщиной [9, 10]. Подобное решение также должно основываться на расчете пластин переменной толщины, контур которых упруго крепится к цилиндрической стенке.

По условиям нагружения таких объектов наиболее напряженным участком являются местастыка (чаще всего, сварки) обечайки и днища [11]. Прочностные расчеты показывают, что именно в этом месте толщина днища

должна быть наибольшей, что приводит к весьма нетехнологичному решению: изготавливать днища сосудов в виде круглых пластин с переменной от центра к краю толщины [12 - 14].

Конструкция такого сложного изделия получается в результате сложных расчетов по уравнениям сопротивления материалов, представляющим собой неоднородные дифференциальные уравнения второй степени [15]. Решение таких уравнений для конкретных объектов записывают в виде суммы общего и частных решений, то есть оно состоит из двух линейно независимых функций [16].

Однако, такие подходы не обеспечивают оптимизацию конструкций сосудов, так как получаемые при этом детали и узлы равного напряжения еще не гарантируют одновременного достижения минимальной массы будущего объекта [17]. В то же время, существует математический аппарат гипергеометрических функций, с помощью которого подобная проблема может быть решена [18, 19].

Для одновременного достижения равнонапряженности и минимальной массы необходимо разработать новый метод, учитывающий такую постановку эффективной оптимизации и модель изгиба пластин разной толщины, необходимую для реализации этого метода.

### Цель работы

Целью настоящего исследования является снижение металлоемкости конструкций на этапе автоматизированного проектирования путем создания равнонапряженных конструктивных элементов при сохранении показателей их надежности за счет рационального перераспределения используемых материалов внутри элемента.

Для достижения этой цели в работе были поставлены и решены следующие задачи:

– разработать метод оптимизации формы круглой пластины переменной толщины, заключающийся в переходе от фиксированной толщины пластиинки в ее центре к ее фиксированному объему;

– разработать модель изгиба круглой пластины переменной толщины в виде экспоненциальной функции Гаусса, учитывающую зависимость толщины в центре пластиинки от ее объема.

### Изложение основного материала

#### **Метод проектирования формы равнонапряженных узлов сопряжения конструкционных элементов.**

Рассмотрим круглые пластиинки радиуса  $R$ , поверхности которых одна плоская и одна вогнутая (рис. 1, а), либо обе – вогнутые (рис. 1, б).

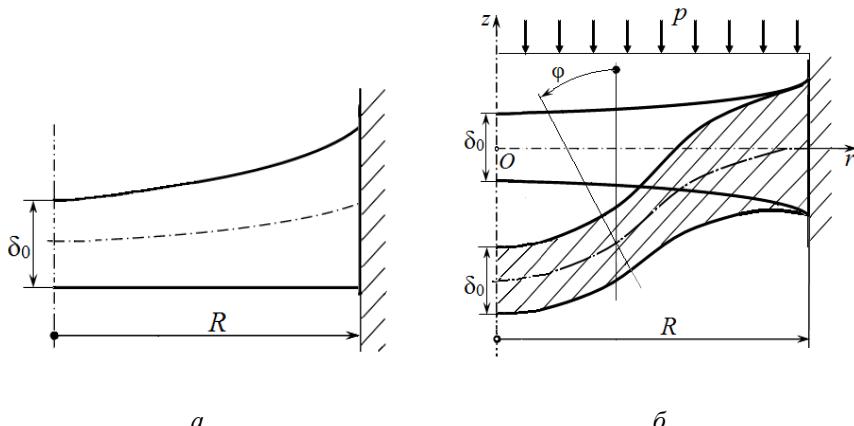


Рисунок 1 – Круглая пластина переменної товщини, защемлена по контуру  $r=R$ : а – плоско-вогнута форма діаметрального сечення; б – двояковогнута форма

Изменение толщины пластинки в радиальном направлении  $r$  в достаточно общем случае можно описать функцией Гаусса [8]:

$$\delta(r) = \delta_0 \exp(-nr^2/6R^2), \quad (1)$$

где:  $\delta_0$  – толщина пластины в центре при  $r=0$ .

Параметр  $n$  в уравнении (1) определяет интенсивность изменения толщины круглой пластины в радиальном направлении. В окружном направлении толщина остается постоянной, т.е. форма пластины предполагается осесимметричной.

Плоско-вогнутая форма сечения пластиинки получается, если  $\delta(r)$  откладывать от плоской нижней поверхности, двояковогнутая – если по обе стороны от плоскости  $z=0$  откладывать размеры  $0,5\delta(r)$ . Получаемая форма диаметрального сечения является общей, так как функцией (1) при положительных значениях параметра  $n$  могут быть описаны также и пластиинки с выпуклыми поверхностями (кривые 4 и 5, рис. 2).

Формы поверхностей с параметром  $n < 0$  можно рекомендовать для круглых пластиин, изгибаемых поперечной нагрузкой  $p$  при жестком защемлении их контура, когда на контуре действует максимальный изгибающий момент (рис. 1, б). При шарнирном закреплении контура максимальный изгибающий момент возникает в центре пластиини, и предпочтительной становится форма с максимальной толщиной в центре.

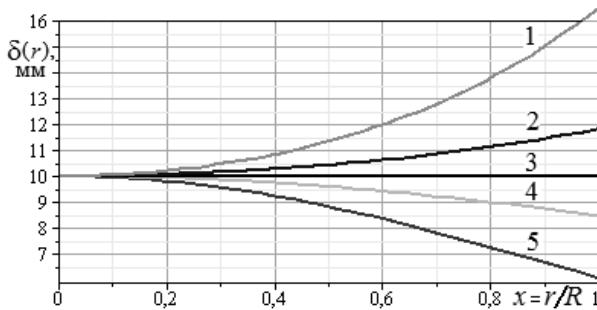


Рисунок 2 – Графики зависимости толщины круглой пластины от её относительного радиуса  $x = r / R$  при  $\delta_0=10$  мм для некоторых значений параметра  $n$ :  
 $n=-3$  (1);  $n=-2$  (2);  $n=0$  (3);  $n=+2$  (4);  $n=+3$  (5)

Для жестко защемленной пластинки эта цель достигается перемещением материала из недогруженной центральной зоны к периферии при сохранении постоянным объема пластины  $V_0$ . Формула, определяющая изменение толщины такой пластины в радиальном направлении, получена из (1) в виде

$$\delta_V(x) = \frac{V_0}{\pi R^2} \cdot \frac{n}{6[1-\exp(-n/6)]} \exp\left(-\frac{nx^2}{6}\right). \quad (2)$$

Второй сомножитель в (2) имеет неопределенность при  $n=0$ . Для этого значения следует принять

$$\lim K(n) \Big|_{n \rightarrow 0} = \lim \frac{n}{6[1-\exp(-n/6)]} \Bigg|_{n \rightarrow 0} = 1. \quad (3)$$

Изменение толщины в радиальном направлении, определяемое функцией (2) для некоторых значений параметра  $n \leq 0$  представлено на рис. 3. Дифференциальное уравнение осесимметричного изгиба такой пластины при равномерно распределенной нагрузке (давлении)  $p$  относительно угла поворота нормали к срединной поверхности  $\phi$  имеет второй порядок [5]:

$$\frac{d^2\phi}{dx^2} + \left(\frac{1}{x} - nx\right) \frac{d\phi}{dx} - \left(\frac{1}{x^2} + \mu n\right) \phi = -\bar{p}x \exp\left(\frac{nx^2}{2}\right) \quad (4)$$

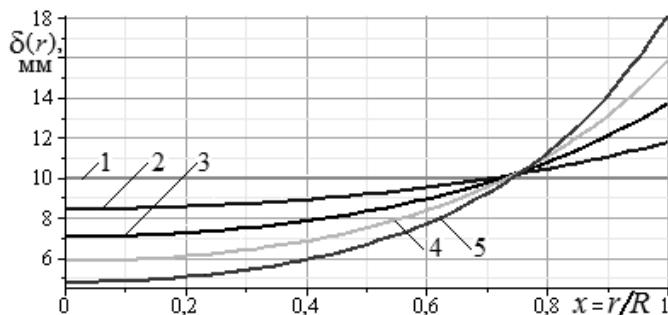


Рисунок 3 – Графики залежності толщины круглой пластины от єї относительного радиуса  $x = r / R$  при  $V_0/(\pi R^2)=10$  мм для некоторых значений параметра  $n$ :  $n=0$  (1);  
 $n=-2$  (2);  $n=-4$  (3);  $n=-6$  (4);  $n=-8$  (5)

Содержащийся в правой части (4) безразмерный параметр  $\bar{p}$  зависит от принятой математической модели диаметрального сечения пластины:

– при уравнении формы пластины в виде (1) имеем:

$$\bar{p} = \bar{p}_\delta = 6(1 - \mu^2) \frac{pR^3}{E\delta_0^3}, \quad (5)$$

– при уравнении формы пластины в виде (2) имеем:

$$\bar{p} = \bar{p}_V = 6(1 - \mu^2) \frac{p}{E} \left[ \frac{6\pi R^3}{V_0} \cdot \frac{1 - \exp(-n/6)}{n} \right]^3 \quad (6)$$

где  $p$  – интенсивность равномерно распределенной нагрузки;  $E$ ,  $\mu$  – модуль упругости и коэффициент Пуассона материала пластины.

Интеграл неоднородного уравнения (2) состоит из двух слагаемых, частного и общего решений.

Частное решение выглядит следующим образом:

$$\varphi_0 = -\frac{\bar{p}x}{(3 - \mu)n} \exp\left(\frac{nx^2}{2}\right), \quad (7)$$

где  $\bar{p}$  определяется формулой (5) или (6), в зависимости от способа задания формы диаметрального сечения пластины.

Общее решение однородного уравнения (4) (при равенстве нулю правой части) задано в [5] степенным рядом, что при практических расчетах представляет определенные вычислительные трудности. В работе решение однородного уравнения представлено с помощью вырожденных гипергеометрических функций Уиттекера  $M_{k,\gamma}(z)$ ,  $W_{k,\gamma}(z)$  [17]:

$$\varphi_1(x) = \frac{\exp(0,25nx^2)}{x} \left[ C_1 M_{k,\gamma} \left( \frac{1}{2} nx^2 \right) + C_2 W_{k,\gamma} \left( \frac{1}{2} nx^2 \right) \right] \quad (8)$$

где  $k=(1-\mu)/2$ ,  $\gamma=1/2$ ;  $C_1$  и  $C_2$  – произвольные постоянные.

Собственные функции решения (8) равны:

$$F_1(x) = x^{-1} \exp(0,25nx^2) M_{k,\gamma} \left( \frac{1}{2} nx^2 \right); \quad (9)$$

$$F_2(x) = x^{-1} \exp(0,25nx^2) W_{k,\gamma} \left( \frac{1}{2} nx^2 \right). \quad (10)$$

Примеры графиков функций (9) и (10) при значениях  $n = 3$  и коэффициенте Пуассона  $\mu = 0,3$  представлены на рис. 4.

Функция  $F_2(x)$  неограниченно возрастает при  $x \rightarrow 0$ , поэтому для круглой пластины принимали в (5)  $C_2=0$ . Для кольцевой пластины константы  $C_1$  и  $C_2$  могут быть определены из граничных условий.

Функции Уиттекера в некоторых случаях усложняют анализ получаемых решений, поэтому нами предложено заменить их функциями Куммера [16, 19]:

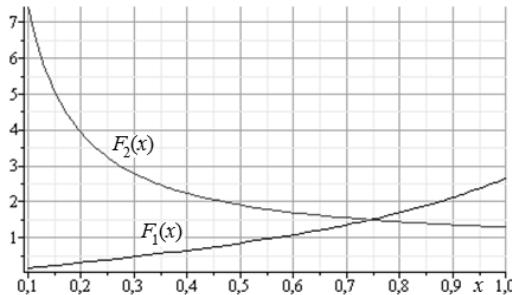


Рисунок 4 – Примеры графиков собственных функций (9) и (10)

$$M_{k,\gamma}(z) = e^{-z/2} z^{1/2+\gamma} M \left( \frac{1}{2} + \gamma - k; 1 + 2\gamma; z \right), \quad (11)$$

$$W_{k,\gamma}(z) = e^{-z/2} z^{1/2+\gamma} U \left( \frac{1}{2} + \gamma - k; 1 + 2\gamma; z \right). \quad (12)$$

После подстановки функций (11) и (12) в (8) получаем:

$$\phi_1(x) = x^{\gamma-1/2} \left[ C_1 M \left( \frac{1}{2} + \gamma - k; 1 + 2\gamma; \frac{1}{2} nx^2 \right) + C_2 U \left( \frac{1}{2} + \gamma - k; 1 + 2\gamma; \frac{1}{2} nx^2 \right) \right]. \quad (13)$$

При приведенных выше значениях параметров  $\gamma$ ,  $k$  и частном решении (7) угол поворота нормали к срединной поверхности пластинки определяется в виде:

$$\phi(x) = \phi_0(x) + \phi_1(x) = \frac{nx}{2} \cdot \left[ C_1 M\left(\frac{1+\mu}{2}; 2; \frac{1}{2} nx^2\right) + C_2 U\left(\frac{1+\mu}{2}; 2; \frac{1}{2} nx^2\right) \right] - \frac{\bar{p}x}{(3-\mu)n} \exp\left(\frac{nx^2}{2}\right). \quad (14)$$

Решение в форме (11) может быть использовано для кольцевых пластинок, т.е. в тех случаях, когда относительный радиус их контуров  $x_l \leq x \leq 1$ . Для сплошных пластинок, например, для днища или крышки цилиндрического сосуда, нужно принимать  $C_2=0$ , т.к. решение с функцией Куммера второго рода  $\frac{nx}{2} \cdot U\left(\frac{1+\mu}{2}; 2; \frac{nx^2}{2}\right)$  неограниченно возрастает при  $x \rightarrow 0$ . Следовательно, решение задачи изгиба сплошной круглой пластинки переменной толщины будем искать в виде:

$$\phi(x) = C_1 \frac{nx}{2} \cdot M\left(\frac{1+\mu}{2}; 2; \frac{1}{2} nx^2\right) - \frac{\bar{p}x}{(3-\mu)n} \exp\left(\frac{nx^2}{2}\right). \quad (15)$$

Очевидно, что решение (15) удовлетворяет необходимому условию  $\phi|_{x=0} = 0$ . Если зависимость угла поворота нормали к срединной поверхности пластинки  $\phi(x)$  определена, то уравнение этой поверхности найдем интегрированием:

$$w(r) = -R \int \phi(x) dx + C_0 = C_0 + \frac{C_1 R [F_1(x) + F_2(x)]}{(1-\mu)(3-\mu)} - \frac{\bar{p} Rx \exp(0,5nx^2)}{(3-\mu)n^2}, \quad (16)$$

где

$$F_1(x) = \left[ 3 - \mu(4 - \mu) - nx^2(3 - \mu) \right] M\left(\frac{1+\mu}{2}; 2; \frac{nx^2}{2}\right), \quad (17)$$

$$F_2(x) = \left[ 3 + \mu(2 - \mu) \right] M\left(\frac{3+\mu}{2}; 2; \frac{nx^2}{2}\right). \quad (18)$$

Перейдем далее к моделям, содержащим нагруженные пластины. В этом случае радиальный и окружной изгибающие моменты определяются формулами:

$$M_r = \frac{D_l(x)}{a} \left( \frac{d\phi(x)}{dx} + \frac{\mu}{x} \phi(x) \right), \quad (19)$$

$$M_t = \frac{D_l(x)}{a} \left( \frac{\phi(x)}{x} + \mu \frac{d\phi(x)}{dx} \right). \quad (20)$$

где цилиндрическая жесткость пластинки с переменной толщиной, соответствующей (1), имеет вид:

$$D_1(x) = \frac{E\delta_0^3}{12(1-\mu^2)} \exp\left(-\frac{nx^2}{2}\right). \quad (21)$$

В результате получаем формулу для радиального изгибающего момента (14). Производная функции (12) выглядит следующим образом:

$$\frac{d\phi}{dx} = C_1 \frac{n}{2} \left[ (1+\mu)M\left(\frac{3+\mu}{2}, 2, \frac{nx^2}{2}\right) - \mu M\left(\frac{1+\mu}{2}, 2, \frac{nx^2}{2}\right) \right] - \frac{\bar{p}(1+nx^2)}{(3-\mu)n} \exp\left(\frac{nx^2}{2}\right) \quad (22)$$

Учитывая (12) и (22), найдем

$$M_r = \frac{D_1(x)}{an} \left\{ C_1 \left[ M_2 + \left( \frac{n^2 x}{2} - \mu \right) M_1 \right] - \frac{\bar{p}(1-x+nx^2)}{(3-\mu)n} \exp\left(\frac{nx^2}{2}\right) \right\} \quad (23)$$

где:

$$M_1 = M\left(\frac{1+\mu}{2}, 2, \frac{nx^2}{2}\right), \quad M_2 = (1+\mu)M\left(\frac{3+\mu}{2}, 2, \frac{nx^2}{2}\right)$$

Из (13) и (18) получены выражения для угла поворота нормали и изгибающего момента на контуре пластиинки

$$\varphi(l) = C_1 \frac{n}{2} M\left(\frac{1+\mu}{2}, 2, \frac{1}{2}n\right) - \frac{\bar{p}}{(3-\mu)n} \exp\left(\frac{n}{2}\right), \quad (24)$$

$$M_r(l) = \frac{D}{a} \left[ C_1 \left[ M_2(l) + (0,5n^2 - \mu)M_1(l) \right] - \frac{\bar{p}x^2}{(3-\mu)} \exp\left(\frac{n}{2}\right) \right]. \quad (25)$$

Для конструирования равнонапряженной пластины после определения изгибающих моментов (19) и (20) вычисляются радиальные напряжения:

$$\sigma_r(x) = \frac{6M_r(x)}{\delta_v(x)}. \quad (26)$$

Затем находим значение параметра  $n$ , при котором:

$$\sigma_r(0) = \sigma_r(l). \quad (27)$$

Постоянную интегрирования  $C_1$  определяем из условий закрепления пластиинки по контуру  $x = 1$ .

### **Модель изгиба круглой пластины переменной толщины**

Работа метода начинается с построения модели изгиба круглой пластиинки переменной толщины. Предложенная модель в виде экспоненциальной функции Гаусса позволяет определять оптимальную (равнонаженную, минимальной массы) форму сплошной круглой пластиинки с произвольным закреплением по внешнему контуру. Рассмотрим абсолютно жесткое закрепление. Найдем для этого случая постоянную интегрирования  $C_1$  из (24) при условии закрепления пластиинки на контуре  $x = 1$ :

$$C_1 = \frac{2\bar{p}}{(3-\mu)n^2} \cdot \frac{\exp(0,5n)}{M(0,5(1+\mu), 2; 0,5n)} \quad (28)$$

Подставляем найденное по (28) значение  $C_1$  в (24) и получаем решение для жесткого закрепления:

$$\phi(x) = \frac{\bar{p}x}{(3-\mu)n} \left[ \frac{\exp(0,5n)}{\exp(0,5nx^2)} \cdot \frac{M(0,5(1+\mu), 2; 0,5nx^2)}{M(0,5(1+\mu), 2; 0,5n)} - 1 \right] \exp\left(\frac{nx^2}{2}\right). \quad (29)$$

Для подтверждения адекватности модели жесткого закрепления в виде экспоненциальной функции Гаусса провели вычислительный эксперимент.

В результате эксперимента получили, что функция угла поворота  $\phi(x)$  при любом значении параметра  $n$  при  $x = 0$  и при  $x = 1$  равна нулю. Это соответствует граничным условиям жесткого закрепления при осесимметричном деформировании пластины, что подтверждает адекватность принятой модели и обеспечивает возможность ее корректного использования в методе оптимизации формы круглой пластины переменной толщины.

### Выводы

Положительный эффект исследования вытекает из практического внедрения его результатов в реальном САПР, действующем на производстве сосудов, работающих под давлением. Для этого на ПАО «Бердичевский машиностроительный завод «Прогресс» были проведены испытания метода проектирования равнонапряженных узлов сопряжения цилиндрических и плоских корпусных элементов на основе моделирования формы последних гипергеометрическими функциями.

В качестве объекта проектирования был выбран бак БСК 16. В результате практических испытаний установлено, что при переходе к новым методам проектирования металлоемкость бака снизилась на 7,15 % при сохранении прочностных характеристик основных деталей и узлов.

### Перспективы дальнейшего развития

Перспективы дальнейшего развития вытекают из подтверждения эффективности использования метода оптимизации формы круглой пластины переменной толщины, заключающегося в переходе от фиксированной толщины пластинки в ее центре к ее фиксированному объему.

Перспективной является также модель изгиба круглой пластины переменной толщины в виде экспоненциальной функции Гаусса, учитывающая зависимости толщины в центре пластинки от ее объема, используемая в рамках предложенного метода.

- Список использованных источников:**
1. Arnab, B., Islam S. M. R. and oth. Finite difference solution to thermoelastic field in a thin circular FGM disk with a concentric hole / Procedia Engineering, 2014. – Vol. 90. – P.193-198.
  2. Житомирський, Г. І. Конструкція самолетов. – М.: Машинобудування, 1995. – 400 с.
  3. Goncharova, O., Maksimov V. and oth Method of Durability Life Approval of Motor Vehicle Axle Beam for Design Optimization. – XVI Conference “Science and Motor Vehicles-97”. – Belgrade, 1997. – P. 175-178.
  4. Водоп'янов, А. І. Причини и механизмы разрушений в эксплуатации лопаток турбины двигателя НК-8-2У / А. І. Водоп'янов, П. В. Павленко // Научный вестник МГТУ ГА. Серия Аэромеханика и прочность, 2007. – № 119. – С. 36-40.
  5. Тимошенко, С. П. Пластины и оболочки / С. П. Тимошенко, С. Войновский-Кригер. – М.: Наука, 1966. – 636 с.
  6. Становский, А. Л. Оптимизация профиля несущих элементов металлоконструкций / А. Л. Становский, В. Г. Максимов и др. // Науковий вісник ОГПУ. – 1998. – № 6. – С. 139-144.
  7. Daschenko, O. Mathematical model of connections cylindrical shell with the bottom variable thickness / O. Daschenko, O. Stanovskyi and oth. // «Information technology and automation – 2016»: Proceedings IX Annual scientific conference. – Odessa, ONAFT, 2016. – P. 29-30.
  8. Вайнберг, Д. В. Расчет пластин / Д. В. Вайнберг, Е. Д. Вайнберг. – К.: Будівельник, 1970. – 436 с.
  9. Евсейчик, Ю. Б. Чувствительность гидроакустического датчика давления / Ю. Б. Евсейчик, К. В. Медведев // Гидравлика и гидротехника. – Киев: НТУ, 2008. – Вып. 62. – С. 10-16.
  10. Шляхин, Д. А. Вынужденные осесимметричные колебания тонкой круглой биморфной пластины ступенчатой толщины и жесткости // Инженерный вестник Дона, 2013. – Вып. 1 (24). – С. 21-25.
  11. ДНАОП 0.00-1.07-9.4. Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением / Киев: Комитет по надзору за охраной труда Украины, 1994. – 55 с.
  12. Коренева, Е. Б. Аналитические методы расчета пластин переменной толщины и их практические приложения. – М.: АСВ, 2009. – 238 с.
  13. Приходько, Н. Б. О двух способах построения теории пластин переменной толщины / Н. Б. Приходько, Г. С. Лейзерович и др. // Ученые записки КнАГТУ. – Комсомольск-на-Амуре, 2014. – № 4-1 (20). – С. 46-54.
  14. Рогалевич, В.В. Новый приближенный метод расчета гибких пластин постоянной и переменной толщины / В.В. Рогалевич, С.А. Тимашев // Академический вестник УРАЛНИИПРОЕКТ, 2012. – № 1. – С. 67-71.
  15. Математическое моделирование профиля равного сопротивления / В. В. Новиков, В. Г. Максимов и др. // Оптимизация в материаловедении. – Одесса: АстроПринт, 1999. – С. 151.
  16. Abramovitz, M. Handbook of mathematical functions with formulas, graphs and mathematical tables // M. Abramovitz, I. A. Stegun – Washington, 1972. – 832 р.
  17. Хомяк, Ю.М. Розв’язок задачі вигину круглої пластини змінної товщини з використанням функцій Уїттекера / Ю.М. Хомяк, Г.Ж. Тшигам // Моделирование в прикладных научных исследованиях. – Одесса: ОНПУ, 2015. – Вып. 23. – С. 79-80.
  18. Kazuhiko, Aomoto fnd oth. Theory of Hypergeometric Functions / Springer, 2011. – Vol. 305. – 317 p.
  19. Кузнецов, Е. А. Методы математической физики / Е.А. Кузнецов, Д.А. Шапиро // НГУ, 2011. – Ч. I. – 131 с.
  20. Optimization of uniformly stressed structures of cylindrical tanks in CAD / O. Saveleva, Yu. Khomyak and oth. // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – Харьков, 2016. – № 6/7 (84). – С. 10-16.

**Bibliography (transliterated):**

1. Arnab, B., Islam S. M. R. and oth. Finite difference solution to thermoelastic field in a thin circular FGM disk with a concentric hole / Procedia Engineering, 2014. – Vol. 90. – P.193-198.
2. Zhitomirskij, G. I. Konstrukcija samoletov. – M.: Mashinostroenie, 1995. – 400 s.
3. Goncharova, O., Maksimov V. and oth Method of Durability Life Approval of Motor Vehicle Axle Beam for Design Optimization. – XVI Conference “Science and Motor Vehicles-97”. – Belgrade, 1997. – P. 175-178.
4. Vodop'janov, A. I. Prichiny i mehanizmy razrushenij v jeksploatacii lopatok turbiny dvigatelya NK-8-2U / A. I. Vodop'janov, P. V Pavlenko // Nauchnyj vestnik MGTU GA. Serija Ajeromehanika i prochnost', 2007. – № 119. – S. 36 – 40.
5. Timoshenko, S. P. Plastinki i obolochki / S. P. Timoshenko, S. Vojnovskij-Kriger. – M.: Nauka, 1966. – 636 с.
6. Stanovskij, A. L. Optimizacija profilja nesushhhih jelementov metallokonstrukcij. / A. L. Stanovskij, V. G. Maksimov i dr. // Naukovij visnik OGPU. – 1998. – № 6. – S. 139-144.
7. Daschenko, O. Mathematical model of connections cylindrical shell with the bottom variable thickness / O. Daschenko, O. Stanovskyi and oth. //

- «Information technology and automation — 2016»: Proceedings IX Annual scientific conference. – Odessa, ONAFT, 2016. – P. 29 – 30. **8.** Vajnberg, D. V. Raschet plastin / D. V. Vajnberg, E. D. Vajnberg. – K.: Budivel'nik, 1970. – 436 s. **9.** Evsejchik, Ju. B., Chuvstvitel'nost' gidroakusticheskogo datchika davlenija / Ju. B. Evsejchik, K. V. Medvedev // Gidravlika i gidrotehnika. – Kiev: NTU, 2008. – Vyp. 62. – S. 10-16. **10.** Shljahin, D. A. Vynuzhdennye osesimmetrichnye kolebanija tonkoj krugloj bimorfnoj plastiny stopenchatoj tolshhiny i zhestkosti // Inzhenernyj vestnik Dona, 2013. – Vyp. 1 (24). – S. 21 – 25. **11.** DNAOP 0.00–1.07–9.4. Pravila ustrojstva i bezopasnoj jeksploatacii sosudov, rabotajushhih pod davleniem / Kiev: Komitet po nadzoru za ohranoj truda Ukrayny, 1994. – 55 s. **12.** Koreneva, E. B. Analiticheskie metody rascheta plastin peremennoj tolshhiny i ih prakticheskie prilozhenija. – M.: ASV, 2009. – 238 s. **13.** Prihod'ko, N.B. O dvuh sposobah postroenija teorii plastin peremennoj tolshhiny / N.B. Prihod'ko, G.S. Lejzerovich i dr. // Uchenye zapiski KnAGTU. – Komsomol'sk-na-Amure, 2014. – № 4–1 (20). – S. 46–54. **14.** Rogalevich, V.V. Novyj priblizhennyj metod rascheta gibkih plastin postojannoj i peremennoj tolshhiny / V.V. Rogalevich, S.A. Timashev // Akademicheskij vestnik URALNIIPROEKT, 2012. – № 1. – S. 67–71. **15.** Matematicheskoe modelirovanie profilja ravnogo soprotivlenija / V. V. Novikov, V. G. Maksimov i dr. // Optimizacija v materialovedenii. – Odessa: AstroPrint, 1999. – S. 151. **16.** Abramovitz, M. Handbook of mathematical functions with formulas, graphs and mathematical tables // M. Abramovitz, I.A. Stegun – Washington, 1972. – 832 p. **17.** Homjak, Ju. M. Rozv'jazok zadachi virginu krugloj plastini zmiinnoj tovshhini z vikoristannjam funkciij Uittekeria / Ju. M. Homjak, G. Zh. Tshigam // Modelirovaniye v prikladnyh nauchnyh issledovanijah. – Odessa: ONPU, 2015. – Vyp. 23. – S. 79–80. **18.** Kazuhiko, Aomoto fnd oth. Theory of Hypergeometric Functions / Springer, 2011. – Vol. 305. – 317 p. **19.** Kuznecov, E.A. Metody matematicheskoy fiziki / E. A. Kuznecov, D. A. Shapiro // NGU, 2011. – Ch. I. – 131 s. **20.** Optimization of uniformly stressed structures of cylindrical tanks in CAD / O. Saveleva, Yu. Khomyak and oth. // Vostochno-evropejskij zhurnal peredovyh tehnologij. – Har'kov, 2016. – No 6/7 (84). – S. 10-16.

Р.М. Стрельчук, канд. техн. наук, Хар'ков, Україна

**КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ  
ТВЕРДОСПЛАВНЫХ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ  
ИЗ НАНОРАЗМЕРНЫХ ЗЕРЕН МОНОКАРБИДА ВОЛЬФРАМА  
ПОСЛЕ АЛМАЗНО-ИСКРОВОГО ШЛИФОВАНИЯ**

Запропоновано модель формування напружено-деформованого стану в шліфованій пластині. В результаті чисельної реалізації моделі виявлені параметри і умови алмазного-искрового шліфування різальних інструментів, оснащених твердосплавними пластинами з нанорозмірних зерен монокарбіду вольфраму із забезпеченням гарантованої якості поверхневого шару.

**Ключові слова:** алмазно-искрове шліфування, напружено-деформований стан, якість поверхневого шару твердосплавних різальних інструментів з нанорозмірних зерен монокарбіду вольфраму, знос різального інструменту

Предложена модель формирования напряженно-деформированного состояния в шлифуемой пластине. В результате численной реализации модели выявлены параметры и условия алмазного-искрового шлифования режущих инструментов, оснащенных твердосплавными пластинами из наноразмерных зерен монокарбида вольфрама с обеспечением гарантированного качества поверхностного слоя.

**Ключевые слова:** алмазно-искровое шлифование, напряженно-деформированное состояние, качество поверхностного слоя твердосплавных режущих инструментов из наноразмерных зерен монокарбида вольфрама, износ режущего инструмента

*A model is proposed for the formation of a stress-strain state in a grinding plate. As a result of the numerical realization of the model, the parameters and conditions for diamond-spark grinding of cutting tools equipped with carbide-tipped plates of nanoscale grains of tungsten monocarbide with guaranteed quality of the surface layer were revealed.*

**Keywords:** diamond-spark grinding, stress-strain state, quality of the surface layer of carbide cutting tools from nanoscale grains of tungsten monocarbide, wear of the cutting tool

## Введение

Качественно сформированная в процессе формообразования режущая кромка инструмента оказывает значительное влияние на процесс резания, износ режущего инструмента и качество обработанной поверхности изделий. Для эксплуатационной надежности и работоспособности режущего инструмента большое значение имеет оптимальная микрогеометрия поверхностей режущей части инструментов. Особо важное значение имеет состояние режущей кромки, работающей, как известно, в условиях контактного нагружения рабочей поверхности. Поэтому к качественной обработке режущих инструментов предъявляются повышенные требования.

## Состояние вопроса и постановка задачи

Анализ технологии изготовления твердосплавных режущих пластин инструмента с заданной геометрией показал, что при подготовке инструмента к работе важно качество формирования режущей кромки, сведение к минимуму дефектов, возникающих на ней и непосредственно в ее близи, обеспечение требуемого уровня остаточных напряжений на поверхности и в приповерхностных слоях [1, 2]. Необходимо изучение закономерностей формирования напряженно-деформированного состояния в твердосплавных пластинах из наноразмерных зерен монокарбida вольфрама при алмазно-искровом шлифовании [3]. Смоделируем и исследуем процесс алмазно-искрового шлифования на примере обработки твердосплавных пластин из наноразмерных зерен монокарбida вольфрама с заданной геометрией для течения закаленных сталей.

## Результаты исследований и их обсуждение

Рассмотрим исходные данные исследования. Шлифуемая режущая платаина, имеющая форму клина с углом заострения  $\beta$ , закреплена неподвижно. Алмазный шлифовальный круг (в данном случае чашечно-конический) вращается вокруг своей оси с постоянной скоростью  $V$  (м/с). Кроме того, шлифовальный круг поступательно движется в сторону шлифуемой пластины с постоянной скоростью, равной величине продольной подачи  $S_{np}$  (м/мин). В процессе алмазно-искрового шлифования с поверхности режущей пластины снимается слой материала равный величине поперечной подачи  $S_{non}$  (мм/дв.ход). В результате кинематического воздействия алмазного инструмента на шлифуемую пластину в зоне обработки возникают силы резания, которые измеряются с высокой точностью. Линейные скорости смещения поверхности слоя материала в месте контакта обрабатываемой пластины и шлифовального круга зависят от радиальных размеров круга.

Примем некоторые допущения для оценки напряженно-деформированного состояния. Материал режущей пластины считаем однородным, сплошным и анизотропным. В процессе обработки он испытывает незначительные деформации. Разрушение материала считаем хрупким, т.е. при превышении предела прочности происходит отслаивание материала. Силы резания, действующие на пластину в процессе обработки, распределены равномерно по передней поверхности вдоль режущей кромки. Допускаем, что режущая кромка является абсолютно острой (радиус округления равен нулю) и внешние силы распределены равномерно по ширине пластины, а задняя поверхность не нагружена.

Упрощенно процесс шлифования рассматривают как результат воздействия на обрабатываемую поверхность движущегося индентора (алмазного зерна). В действительности поверхность алмазного круга

представляет собой распределенные по объему зерна примерно одного размера и сами зерна геометрически отличаются друг от друга. В результате каждое зерно в круге снимает малую часть материала. Допущение об однородной поверхности круга может приводить к завышенным значениям параметра качества поверхностного слоя режущей кромки. Тем не менее, распределение дефектов в режущей кромке должно быть подобно тому, что реализуется на практике. Уровень остаточных напряжений и степень дефектов твердых сплавов в зоне шлифования зависят от большого количества технологических и физических факторов. Определение рационального сочетания параметров процесса шлифования зависит не только от физико-механических свойств обрабатываемого материала, но и конкретных геометрических размеров изделия.

Для исследования формирования напряженно-деформированного состояния в зоне шлифования пластины из твердого сплава марки ВолКар была использована вычислительная модель, разработанная в рамках подхода механики повреждаемых сред [4]. Модель позволяет оценить давления, интенсивность напряжений и состояние, возникающие в материале пластины в процессе алмазно-искрового шлифования. Для численной реализации модели, в качестве примера, исследован твердый сплав из наноразмерных зерен монокарбида вольфрама марки ВолКар. Данные о механических характеристиках сплава ВолКар взяты в литературе [5].

Модельные образцы подвергались рентгеновскому исследованию на дифрактометре ДРОН 2.0 в фильтрованном излучении железного анода. Дифрактограммы регистрировались поточечно через  $0,1^\circ$  с экспозицией в каждой точке  $10''$ . Размер областей когерентного рассеяния оценивался по уширению линии (001) по формуле Селякова-Шеррера. Анализ напряженного состояния проводился с помощью  $\sin^2\psi$ -метода. Для съемок было выбрана линия (112) на угле  $2\theta \approx 145^\circ$ . Для каждого образца было проведена перпендикулярная съемка и наклонные съемки при  $\psi = \pm 30^\circ$  и  $\pm 50^\circ$ . Уровень напряжений определяли по формуле:

$$\sigma = \frac{E}{1+\mu} \cdot \frac{d_\psi - d_\perp}{d_\perp} \cdot \frac{1}{\sin^2 \psi}, \quad (1)$$

где  $E$  – модуль нормальной упругости;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $d_\psi$ ,  $d_\perp$  – межплоскостные расстояния, измеренные под углом и по нормали к поверхности образца;  $\psi$  – угол между нормалью к поверхности образца и соответствующей нормалью к отражающим плоскостям. В расчетах приняты макроскопические значения упругих постоянных:  $E=720$  ГПа,  $\mu=0,18$ . Для характеристики состояния поверхностного слоя проводился качественный фазовый анализ, оценивался размер областей когерентного рассеивания и уровень (величина и знак) остаточных макронапряжений.

Начальные условия выбраны в предположении об отсутствии во всем материале пластины внутренних остаточных напряжений и равномерном распределении температуры.

Моделирование проводилось для граничных условий, имитирующих взаимодействие обрабатываемой пластины с алмазным кругом. Для этого была построена расчетная область, соответствующая обрабатываемой пластине из твердого сплава ВолКар. Габаритные размеры пластины в расчетной модели были приняты равными: высота  $c = 3$  мм, ширина пластины  $a = 12$  мм, длина пластины  $b = 12$  мм, угол заострения  $\beta = 80^\circ$ . Расчетные значения интенсивности сдвиговых напряжений, возникающих при шлифовании с заданным распределением по обрабатываемой поверхности прижимающего усилия резания (10 Н, 100 Н, 300 Н), линейной скорости сдвига материала с обрабатываемой поверхности (15 м/с, 25 м/с, 45 м/с), температуры (430 °C, 1000 °C) в зоне шлифования.

Решение вычислительной модели выполнено на примере твердого сплава ВК6 с помощью метода конечных элементов, реализованного в программном комплексе AUTODYN TM / ANSYS Workbench -13.

На рис. 1, а, б показаны изменения во времени расчетных значений интенсивности сдвиговых напряжений в точках 1, 2, 3, а также формирующееся квазистационарное поле этого параметра при скорости сдвига  $V = 45$  м/с, температуре 1000 °C и прижимающих усилиях 10 и 100 Н. При прижимающих усилиях 300 Н (рис. 1, в) поле интенсивности сдвиговых напряжений нестационарно, что свидетельствует о развитии повреждений на глубине выше 1 мм с последующим разрушением пластины.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что в зоне режущей кромки пластины у поверхности шлифования сдвиговые напряжения достаточны для развития пластических деформаций. Развитие пластических деформаций приводит к релаксации сдвиговых напряжений и обуславливает осциллирующий характер их изменения (см. рис. 1). С удалением от поверхности режущей кромки на величину, превышающую вдвое толщину удаляемого материала, напряжения постепенно уменьшаются и не представляют опасности с точки зрения развития пластических деформаций и повреждений материала. Проведена оценка качества поверхностного слоя твердосплавной пластины ВолКар при различном сочетании сил резания, скорости и температуры. Получены модели распределения давления и интенсивности напряжений в теле исследуемой пластины.

Наибольший практический интерес имеет распределение значений параметра поврежденности вблизи режущей кромки. Получены модели распределения поврежденности в теле исследуемой пластины. Кроме того, проведено оптическое исследование участков поверхности твердосплавных пластин после алмазно-искрового шлифования в тех же условиях [3]. Сопоставление данных, полученных в результате экспериментальных исследований и при численной реализации модели, выявило расхождения, не превышающие 10...15 %, что позволяет сделать вывод об адекватность полученной модели.

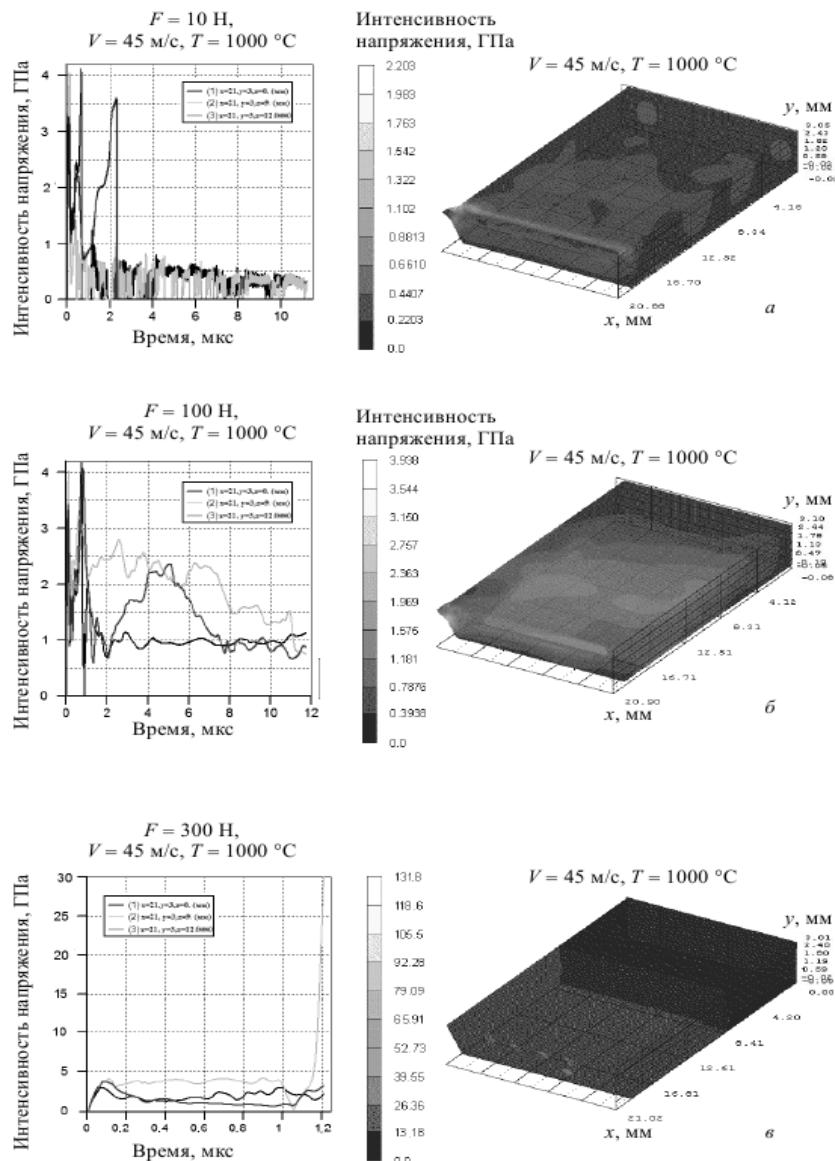


Рисунок 1 – Розрахункові значення інтенсивності напруження

## Выводы

Анализ результатов исследования позволил сделать следующие выводы. Предложена адекватная физико-математическая модель процессов деформации, повреждения и разрушения материала типа ВолКар при шлифовании алмазным кругом, позволяющая проводить оценку формирующегося напряженно-деформированного состояния в обрабатываемой пластине. Расчетная модель реализована на примере алмазно-искрового шлифования твердосплавной пластины марки ВолКар с заданными геометрическими параметрами, характерными для режущего инструмента, предназначенного для обработки изделий из закаленных сталей. Модель может быть адаптирована и для других композиционных высокопрочных и труднообрабатываемых материалов. Таким образом, имеется возможность оценить напряженно-деформированное состояние при различных сочетаниях алмазного инструмента и обрабатываемого материалов.

**Список использованных источников:** 1. Фукс М.Я., Беззубенко Н.К., Свердлова Б.М. Состояние поверхности слоя материалов после алмазной и эльборовой обработки. – К.: Вища школа, 1979. – 160 с. 2. Шульман П. А. и др. Качество поверхности, обработанной алмазами. – Киев, «Техніка». – 1972. – 148 с. 3. Колупаева З.И. Исследование и анализ взаимосвязи остаточных макронапряжений и износстойкости инструментов изnanoструктурного твердого сплава «ВолКар» после алмазно-искрового шлифования / З.И. Колупаева, Р.М. Стрельчук, М.Д. Узунян // Резание и инструмент в технологических системах. – 2010. – Вып. 78. – С. 85-91. 4. Стрельчук Р.М. Физическое моделирование напряженно-деформированного состояния твердосплавных инструментов из наноразмерных зерен монокарбida вольфрама при шлифовании / Р.М. Стрельчук // Резание и инструмент в технологических системах. – 2016. – Вып. 86. – С. 160-169. 5. Геворкян Э. С. Плотные и пористые конструкционные материалы из nano и субмикронных порошков WC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и SiC полифункционального назначения. Дисс. докт. техн. наук / Э. С. Геворкян – Харьков, 2007 – 276 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Fuks M.Ya., Bezzubenko N.K., Sverdlova B.M. Sostoyanie poverhnostnogo sloya materialov posle almaznoy i elborovoy obrabotki. – K.: Vischa shkola, 1979. – 160 s. 2. Shulman P. A. i dr. Kachestvo poverhnosti, obrabotannoy almazami. Kiev, «Tehnika», 1972, 148 s. 3. Kolupaeva Z.I. Issledovanie i analiz vzaimosvyazi ostatochnyih makronapryazheniy i iznosostoykosti instrumentov iz nanostrukturnogo tverdogo splava «VolKar» posle almazno-iskrovogo shlifovanija / Z.I. Kolupaeva, R.M. Strelchuk, M.D. Uzunyan // Rezanie i instrument v tehnologicheskikh sistemah. - 2010. – Vyip. 78. – S. 85-91. 4. Strelchuk R.M. Fizicheskoe modelirovaniye napryazhennno-deformirovannogo sostoyaniya tverdosplavnyih instrumentov iz nanorazmernyih zeren monokarbida volframa pri shlifovanii / R.M. Strelchuk // Rezanie i instrument v tehnologicheskikh sistemah. - 2016. – Vyip. 86. – S. 160-169. 5. Gevorkyan E. S. Plotnyie i poristye konstruktsionnyie materialy iz nano i submikronnyih poroshkov WC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> i SiC polifunktional'nogo naznacheniya. Diss. dokt. tehn. nauk / E. S. Gevorkyan – Harkov, 2007 – 276 s.

УДК 004.942:62-272.6

П.С. Швець, канд. техн. наук, А.В. Торопенко, канд. техн. наук,  
В.Ш. Хуссайн, С.М. Кошулян, Одеса, Україна

## ОПТИМАЛЬНЕ ПРОЕКТУВАННЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Композиційні об'єкти створюються для отримання синергетичного ефекту від поєднання різних властивостей матеріалів. Це породжує багатоцільові задачі оптимізації щодо вибору цих матеріалів та автоматизованого проектування структури та параметрів самих об'єктів. Звичайні методи розв'язання таких задач, – чисельні, аналітичні, – не підходять для складних об'єктів із нелінійними властивостями. Запропоновано метод віртуальних моделей в САПР композиційних об'єктів.

**Ключові слова:** композиційні об'єкти, віртуальні моделі

Композиционные объекты создаются для получения синергетического эффекта от сочетания различных свойств материалов. Это порождает многоцелевые задачи оптимизации выбора этих материалов и автоматизированного проектирования структуры и параметров самих объектов. Обычные методы решения таких задач, – численные, аналитические, – не подходят для сложных объектов с нелинейными свойствами. Предложен метод виртуальных моделей в САПР композиционных объектов.

**Ключевые слова:** композиционные объекты, виртуальные модели

*The composite objects are created to obtain a synergistic effect from a combination of various properties of materials. This generates multi-purpose optimization tasks for selecting these materials and automated design of the structure and parameters of the objects themselves. The usual methods of solving such problems – numerical, analytical, – are not suitable for complex objects with nonlinear properties. The method of virtual models in CAD of composite objects is proposed.*

**Keywords:** composite objects, virtual models

### Постановка проблеми та її зв'язок із важливими науково-практичними завданнями

На сьогоднішній день в сучасній промисловості широко використовуються деталі та вузли, які або складені із різних за властивостями матеріалів, або, навіть із матеріалів, що нелінійно змінюють свої властивості в просторі або часі (анізотропні та такі, що регулюються) [1, 2]. Зрозуміло, що до проектування таких елементів, особливо автоматизованого, пред'являються значно суворіші умови з точки зору використання сучасних методів та адекватності оптимізаційних моделей. Адже досягнення синергетичного ефекту від використання в одній деталі багатьох різних за властивостями матеріалів потребує нових підходів до розв'язання задач оптимізації в САПР, безумовно, оптимізації багатоцільової, багатовимірної та багатоекстремальної.

В той же час деякі існуючі методи такої оптимізації не отримали достатнього розвитку, що суттєво звужує можливості виробництва та негативно впливає на конкурентоспроможність його продукції. Зокрема, в статті йдеться про вдосконалення методу віртуальної моделі для оптимізації композиційних виробів.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Існує клас деталей та вузлів машин, пристріїв, апаратів, тощо, в яких композиційність створюється навмисне при проектуванні або отримується мимовільно – як продукт оптимізації за зовсім іншими цільовими функціями виробу в цілому. До першого типу можна віднести електромеханічні фільтри та гумометалеві амортизатори, в яких на етапі проектування зкладається максимальна спроможність поглинати ударні хвилі певних частот [3 - 5], а до другого – «штучний» механічний фільтр, який виникає поза спеціальними розрахунками та діє в транспортному засобі між дорогою та тілом людини [6 - 8].

Оскільки усі розрахункові задачі в САПР, як правило, обернені, – в них по заданих наслідках розраховують причини їхнього виникнення, – вони відрізняються некоректністю: прийнятного рішення може не бути взагалі, або таких рішень може бути кілька [9]. Ще одним недоліком методів оптимізації полі матеріальних об'єктів є те, що такі задачі не можна розв'язувати аналітичним або чисельним методами, оскільки вони, як правило, мають велику комп'ютерну складність. В той же час існують сучасні методи розв'язання подібних задач, в яких проектувальники вдаються до створення проміжних моделей об'єкта проектування із нездійсненими властивостями, – віртуальних об'єктів [10]. Віртуальність моделей таких об'єктів може торкатися конфігурації моделюючого об'єкта, нездійсненої в реальному житті [11], виконання об'єкта або його окремих частин із неіснуючими матеріалів [12], одночасного прикладання до об'єкта зовнішніх сил, які мають різне значення [10], тощо.

Але, на жаль, для багатошарових об'єктів методи віртуального моделювання не існують і потребують додаткової розробки.

### Мета роботи

Метою роботи є підвищення якості автоматизованого проектування об'єктів транспорту, машинобудування, пристрійобудування, хімічної та харчової промисловості, які складаються із суттєво різних за властивостями елементів, за рахунок створення методу оптимізації структури та параметрів таких композиційних деталей та вузлів.

Для досягнення цієї мети в роботі були висунуті та розв'язані такі задачі:  
– критично проаналізовані існуючі методи розв'язання задач оптимізації

структур та параметрів багатошарових об'єктів в САПР;

– удосконалено метод віртуальної моделі для використання в задачах оптимізації структури та параметрів багатошарових об'єктів в САПР;

– виконані випробування запропонованого методу при проектуванні гумометалевих виробів з позитивним техніко-економічним ефектом.

### Викладення основного матеріалу

#### **Аналітичний метод розв'язання задач оптимізації композиційних об'єктів**

Розглянемо відносно просту задачу. Хай деякому впливу треба розповсюдитися від точки  $(0; 0)$  (рис. 1) до точки із координатами  $(x_A; L)$ , доляючи при цьому шлях між цими точками крізь дві зони (І та ІІ) двома відрізками прямих ОХ та ХА.

Точка X завжди розташована на границі між зонами I та II, ширина яких, відповідно,  $l_I$  та  $l_{II}$ :

$$l_I + l_{II} = L, \quad (1)$$

Якщо властивості (наприклад, швидкість) перенесення впливу однакові ( $v_I = v_{II} = v$ ) для обох зон, найшвидшим шляхом між О і А буде відрізок ОА, а час його подолання, відповідно:

$$\tau = \frac{l_{OA}}{v}. \quad (2)$$

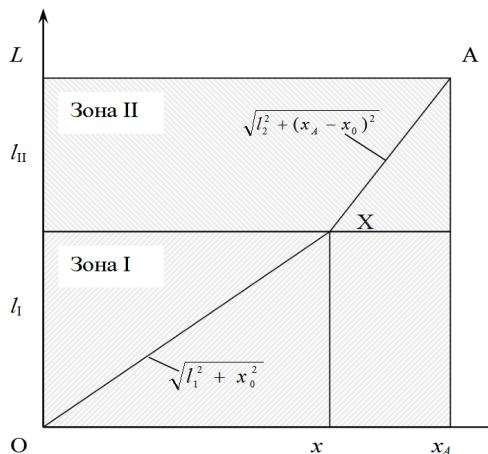


Рисунок 1 – Схема до розрахунку оптимального за часом шляху подолання двох зон із різними протяжністю та властивостями

Якщо швидкості  $v_I$  та  $v_{II}$  нерівні, «прямий» шлях ОА, з точки зору мінімуму часу, стає неоптимальним, і задача оптимізації зводиться до пошуку такої точки «перелому» шляху  $X(l; x)$  при якій

$$\tau_I + \tau_{II} = \tau_{\min}. \quad (3)$$

Оскільки  $l_I$  – задане число, пошук зводиться до розрахунку  $\chi_{\min} \rightarrow \tau_{\min}(x)$ . Тепер сформулюємо задачу оптимізації. В загальному вигляді вона формулюється так:

$$x \in X: f(x) = \min_{x \in \{X\}} f(x). \quad (4)$$

Для одновимірного випадку вираз (4) виглядає таким чином:

$$x \in \{0; x_A\}: f(x^*) = \min_{x \in \{0; x_A\}} f(x). \quad (5)$$

Для побудови  $f(x)$  згадаємо, що метою оптимізації в задачі (5) в нашому випадку є мінімізація часу перенесення впливу від О до А, а також, що цей час є сумою часу перенесення від точки О до точки Х і від точки Х до точки А із відповідними швидкостями:

$$\tau_I = \frac{l_I}{v_I}; \quad (6)$$

$$\tau_{II} = \frac{l_{II}}{v_{II}}; \quad (7)$$

$$\tau = \tau_I + \tau_{II}. \quad (8)$$

Таким чином, цільовою функцією оптимізації є час  $\tau$ , а єдиним оптимізуючим аргументом – координата  $x$  точки Х. Інші характеристики ( $l_I$ ,  $l_{II}$ ,  $v_I$ ,  $v_{II}$ ,  $x_A$ ) є в конкретному розрахунку сталими і можуть варіюватися в процесі зміни проектованих параметрів у двоматеріальному об'єкті.

З рис. 1 та виразів (6) – (8) отримуємо:

$$\tau_I = \frac{\sqrt{l_I^2 + x^2}}{v_I}; \quad (9)$$

$$\tau_{II} = \frac{\sqrt{l_{II}^2 + (x_A + x)^2}}{v_{II}}; \quad (10)$$

$$\tau = \frac{\sqrt{l_I^2 + x^2}}{v_I} + \frac{\sqrt{l_{II}^2 + (x_A + x)^2}}{v_{II}}. \quad (11)$$

Для розв'язання задачі оптимізації, побудованої із (5) та (11):

$$x \in \{0; x_A\}: f(x^*) = \min_{x \in \{0; x_A\}} \frac{\sqrt{l_I^2 + x^2}}{v_I} + \frac{\sqrt{l_{II}^2 + (x_A + x)^2}}{v_{II}}, \quad (12)$$

призначимо сталі:  $l_I = 1$  м,  $l_{II} = 2$  м,  $v_I = 1$  м/с,  $v_{II} = 0,5$  м/с,  $x_A = 10$  м.  
Тоді вираз (12) перетворюється на:

$$x \in \{0; x_A\}: f(x^*) = \min_{x \in \{0; x_A\}} (\sqrt{1+x^2} + \sqrt{64+16(10-x)^2}) \quad (13)$$

Оптимізацію виразу, який в (13) стоїть під знаком  $\min$ , можна виконати двома способами.

Перший спосіб – аналітичний. Для цього візьмемо похідну:

$$\frac{\partial \tau}{\partial x} = \frac{x}{v_I \sqrt{l_I^2 + x^2}} + \frac{x_A - x}{v_{II} \sqrt{l_{II}^2 + (x_A - x)^2}} \quad (14)$$

та прирівнямо її до 0:

$$\frac{x^*}{v_I \sqrt{l_I^2 + x^{*2}}} + \frac{x_A - x^*}{v_{II} \sqrt{l_{II}^2 + (x_A - x^*)^2}} = 0. \quad (15)$$

Розв'язуючи рівняння (15) отримуємо значення  $x^* = 9,12$  м, а відповідний йому мінімальний час  $\tau_{\min}(x^*) = 17,928$  с.

На жаль, обчислювальний шлях лише до одного результату (а в САПР такі результати перебирають тисячами) в найпростішому випадку (две зони, які складаються з ізотропних матеріалів) виявляється настільки великим, що його не можна рекомендувати до практичного використання.

### Чисельний метод розв'язання задач оптимізації композиційних об'єктів

Скористаємося формулою (11) і будемо варіювати шукане значення  $x^*$  по дискретних значеннях  $x = 0, 1, 3, 5, 7, 9$ . Результати занесемо до табл. 1 (варіант)

Таблиця 1 – Результати наближеного розрахунку композиційного об’єкта

$x, \text{ м}$	$\tau, \text{ с} \quad 1 \text{ варіант}$	$\tau, \text{ с} \quad 2 \text{ варіант}$
0	40,8	11,00
1	38,3	10,61
3	30,0	10,44
5	27,0	10,47
7	21,0	10,67
9	18,05	11,28
10	18,04	12,04

Як бачимо, оптимальне  $\tau$  зменшується монотонно, і його найменше значення співпадає із  $x = 10$ , тобто точка Х опиняється на межі допуску на своє існування. Це протирічить фізичному сенсу початкової задачі.

Змінимо сталі задачі на  $l_1 = 1 \text{ м}$ ,  $l_{\text{II}} = 2 \text{ м}$ ,  $v_1 = v_{\text{II}} = 1 \text{ м/с}$ ,  $x_A = 10 \text{ м}$ . В цьому наборі властивості зон співпадають, а отже оптимальним шляхом між точками О та А є відрізок OA. Вираз (11) перетворюється на:

$$\tau = (\sqrt{1+x^2} + \sqrt{4+(10-x)^2}), \quad (16)$$

а розрахунки за ним представлені в табл. 1 (2 варіант). Як бачимо, в цьому прикладі  $x = 3 \text{ м}$  (оскільки товщина зон різна).

Повертаємося до першого варіанту і виказуємо припущення, що значення  $x^*$ , яке мінімізує час, знаходиться між  $x = 9 \text{ м}$  та  $x = 10 \text{ м}$ . Будуємо табл. 2, в якій знаходимо цей оптимум:  $x^* = 9,5 \text{ м}$ ;  $\tau_{\min}(x^*) = 17,798 \text{ с}$ .

Таблиця 2 – Результати уточнюючого розрахунку композиційного об’єкта

$x, \text{ м}$	$\tau, \text{ с} \quad 1 \text{ варіант}$
9	18,5
9,1	17,928
9,5	17,798
10	18,04

Як бачимо, результат приблизно знайдено, але й цей, чисельний шлях виявляється досить складним навіть для найпростішого двохшарового варіанту. Більш точний результат розв’язання задачі (12) може бути знайдений, наприклад, методом підбору, що навіть для зовсім простої двовимірної задачі є математично складним виробуванням.

## Метод віртуальної моделі оптимізації композиційних об'єктів

В попередніх прикладах розмірність задачі оптимізації дорівнювала двом. Переїдемо тепер до об'єктів із необмеженою розмірністю. Нехай об'єкт проектування  $\Omega$  має тепер наступні атрибути:

$x$  – вектор розмірних параметрів (конфігурація);

$\lambda$  – вектор характеристик матеріалів, з яких складається об'єкт;

$q$  – вектор зовнішніх впливів на об'єкт.

Якщо розглядати комплекс цих множин  $\{x, \lambda, q\}$  як параметрів-причин, то параметрами-наслідками або реакціями може вважатися деякий вектор чисел  $r$ , відповідний в деякому сенсі початковому об'єкту  $\Omega$ :

$$r = r(x, \lambda, q). \quad (17)$$

Задача (17) пряма: по трьом векторам-причинам знайти вектор-реакцію. До неї існують три обернені задачі.

1. За відомими реакцією  $r$ , характеристикам  $\lambda$  і дії  $q$  знайти конфігурацію  $x$ :

$$x = x(r, \lambda, q). \quad (18)$$

2. За відомими реакцією  $r$ , конфігурації  $x$  і дії  $q$  знайти характеристики  $\lambda$ :

$$\lambda = \lambda(x, r, q). \quad (19)$$

3. За відомими реакцією  $r$ , характеристикам  $\lambda$  і конфігурації  $x$  знайти вплив  $q$ :

$$q = q(x, \lambda, r). \quad (20)$$

У проектуванні вирішуються перша і друга обернені задачі (18) і (19), в управлінні – третя (20).

Рішення цих задач неаналітичними методами, наприклад, методом перебору передбачає заміну однієї оберненої задачі (18), (19) або (20) деякою множиною прямих (17). При цьому, як сказано вище, розв'язуючий алгоритм різко ускладнюється, настільки ж різко зростає його часова складність. Зокрема, для проектування за допомогою зміни зовнішнього впливу  $\Delta q$  на об'єкт  $\Omega$  вирішальний алгоритм підбору виглядає так [12]:

1 – вибрati деяке початкове рiшення  $\Delta q = \Delta q_{пoch}$ ;

2 – вирiшуючи пряму задачу (17), розрахувати  $r_{пoch}(\Delta q_{пoch})$ ;

3 – визначити допустимiсть вiдхилення  $r_{пoch}$  вiд областi  $r \in R$ ;

4 – якщо вiдхилення допустимо, зупинитися, якщо нi, – повернутися до п. 1, змiнити  $\Delta q_{пoch}$  i повторювати пп. 2 – 4 до зупинки.

Таким чином, рiшення методом перебору припускає деякий «рух» в областi визначення можливих зовнiшнiх впливiв на об'єкт  $q \in Q$ . У

переважній більшості випадків проектування такий «рух» неможливий із-за особливостей параметра, вздовж якого необхідно рухатися. Наприклад, не завжди можливо вільно варіювати характеристики матеріалу, з якого планується виробити об'єкт. Для розв'язання цієї проблеми створюється *віртуальна* модель об'єкта проектування. В ній, допускаються різні, неможливі в реальному світі стани окремих елементів (рис. 2) [12].

Віртуальний об'єкт припускає рух в напрямку підбору квазіоптимальних рішень вздовж будь-якого параметра, незалежно від його доцільності і реальної можливості. Такий рух створює квазіоптимальну модель, для якої в реальному світі не існує відповідного до цієї моделі об'єкта.

Нехай для пошуку оптимальної конструкції деякого об'єкта необхідно «рухатися» вздовж параметра  $P_1$  його моделі, але розв'язуючий алгоритм такий рух обмежує, наприклад, високою часовою складністю комп'ютерних обчислень (заборона А). Нехай рухом вздовж параметра  $P_2$  моделі також можна оптимізувати управління об'єктом (назовемо цей процес квазіоптимізацією), але такий рух забороняє фізична основа об'єкта (заборона Б).

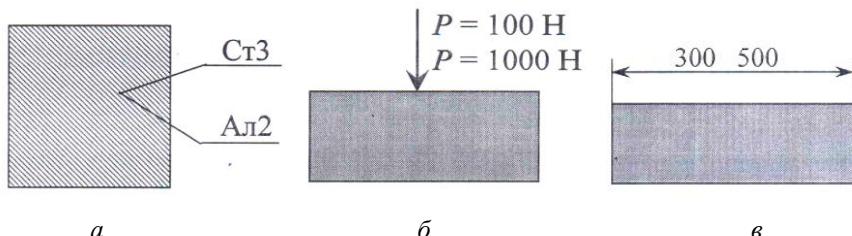


Рисунок 2 – Варіанти віртуальних об'єктів в механіці:

*a* – елемент одночасно виконаний зі сталі та алюмінію;

*b* – на елемент одночасно в одній точці діють різні за величиною сили;

*v* – елемент одночасно має різні значення одного й того ж розміру

У разі «звичайної» моделі в цих умовах доводиться рухатися, змінюючи  $P_1$ , – адже така, що суперечить здоровому глузду, заборона Б нездоланна! Інша річ – якщо модель віртуальна, – в ній немає ніяких заборон! Тоді, рухаючись в напрямку  $P_2$  всередині віртуальної моделі, знайдемо спочатку квазіоптимальний (віртуальний) керуючий вплив  $\Delta q_{\text{кв}}.$

Далі має бути фінішний переход від квазіоптимального впливу  $\Delta q_{\text{кв}}$  до оптимального  $\Delta q_{\text{опт}}$ . Завдання вирішено і заборона А обійтена. Результат – значне зниження часової складності пошуку оптимального керуючого впливу. Таким чином, пропонований метод складається з двох етапів: квазіоптимізації і фінішного переходу.

Наведемо конкретний приклад. Розглянемо проектування матеріального об'єкта у вигляді багатошарової пластини (рис. 3). Необхідно спроектувати товщину та матеріал окремих пластин так, щоб пластина працювала в якості фільтра, який на шляху від джерела широкого спектра коливань Дж до приймача Пр подавляє деякий заданий спектр частот.

Для розрахунку параметрів розповсюдження коливань крізь цей об'єкт розглянемо віртуальну модель цього об'єкта, в якій джерело А випромінює коливання тільки однієї частоти, причому *одночасно різної*. Далі для кожного окремого шару обчислюємо таку частоту, яка найбільш відповідає умовам задачі. Фінішний перехід полягає у відтворенні фізично припустимого стану (частота єдина), що досягається відповідним перерахуванням товщин шарів об'єкта.

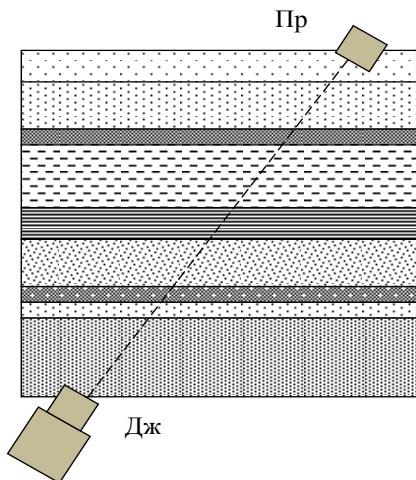


Рисунок 3 – Багатошарова пластина із різними властивостями окремих шарів:  
Дж – джерело коливань; Пр – приймач коливань

### **Практичні випробування результатів дослідження**

В ПАТ «Одеський завод гумових технічних виробів» було проведено випробування САПР процесу виготовлення композиційних виробів. В якості об'єкта проектування використовували технологічний процес ліття під тиском гумової суміші при виробництві гумометалевих амортизаторів типу AKCC-10M та KPM (рис. 4, а, б).

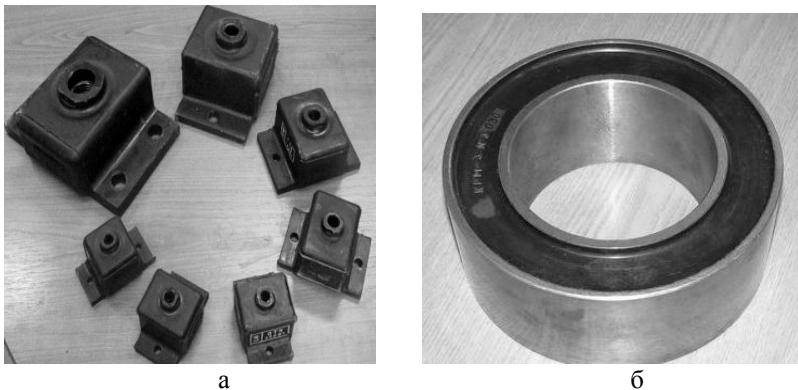


Рисунок 4 – Гумометалові композиційні вироби типу «Силовий композиційний елемент» (гумометалові амортизатори): *а* – типу АКСС, *б* – типу КРМ

В результаті випробувань встановлено, що використання процесу виготовлення композиційних виробів дозволило знизити відсоток браку в партії гумометалових амортизаторів АКСС-10М та КРМ на 39,14 % при забезпеченні заданих властивостей деталей.

### Висновки

В результаті аналізу існуючих методів розв'язання задач проектування структури та параметрів багатошарових об'єктів в САПР встановлено, що обчислювальна складність виникаючих при цьому задач оптимізації не завжди дозволяє застосовувати для цього «звичайні» аналітичні та чисельні методи.

Наведені приклади постановки та розв'язання таких задач для композиційних об'єктів за допомогою методу віртуальної моделі. Метод дозволяє уникнути складних обчислень в напрямку підбору реальних параметрів і замінити їх на створення «нemожливих» віртуальних характеристик об'єктів із подальшим перерахуванням їх до реального результату проектування.

Розроблені методи та моделі дозволили запропонувати нові підсистеми та створити загальну САПР, призначену для автоматизованого проектування композиційних виробів будь-яких видів та складів матеріалів, які входять до композиції та технології їхнього виготовлення [14]. В результаті випробувань цієї САПР знижено відсоток браку в партії гумометалових амортизаторів АКСС-10М та КРМ на 39,14 % при забезпеченні заданих властивостей проектованих деталей.

## Перспективи подальшого розвитку

Результати дослідження підтверджують практичну можливість використання методу віртуальної моделі при оптимізації композиційних об'єктів в САПР.

Метод може бути застосований при проектуванні конструкцій та технологічних процесів виготовлення досить складних за будовою та досить відповідальних за призначенням композиційних поліматеріальних деталей.

- Список використаних джерел:**
1. *Становская, Т. П. Подвеска транспортного средства как нелинейный фильтр / Т.П. Становская, О.С. Савельева и др. // Материалы XII семинара «Моделирование в прикладных научных исследованиях». – Одесса: ОНПУ, 2005. – С. 63-64.*
  2. *Становський, О.Л. Автоматизоване проектування технології виготовлення гумовометалевих виробів / О.Л. Становський, Е.Ю. Лебедєва і др. // Восточно-европейский журнал передовых технологий. Процессы управления. – Хар'ков, 2015. – № 5/1 (77). – С. 23-28.*
  3. *Лосев, А.К. Теория и расчет электромеханических фильтров / А.К. Лосев – М.: Связь, 1965. – 262 с.*
  4. *Павлов, А. Н. Высокодобротный электромеханический фильтр низкочастотных сигналов / А. Н. Павлов // Измерительная техника. – 2003. – № 10. – С. 39-40.*
  5. *Shvets, P.S. The computer-aided design of rubber-metal products / P.S. Shvets, O.Yu. Lebedeva and oth. // Праці Одеського національного політехнічного університету. – Одеса: ОНПУ, 2015. – С. 63 – 72.*
  6. *Балан, С.А. Моделирование передаточных частотных характеристик элементов автотранспортных средств / С.А. Балан, Т.П. Становская и др. // Труды Одесского политехнического университета. – 1999. – Вып. 3. – С. 71-73.*
  7. *Балан, С.А. Метод виртуального объекта в управлении тормозными системами с внутренней виброзащитой / С.А. Балан, Т.П. Становская и др. // Труды Одесского политехнического университета. – 2000. – Вып. 2. – С.29-32.*
  8. *Сидоренко, И.И. Активная виброзащитная система с механической обратной связью по величине передаваемой нагрузки / И.И. Сидоренко // Труды Одесского политехнического университета. – 1999. – № 2(8). – С. 51-54.*
  9. *Гончарова, О. Е. Нечувствительный к асимметрии численный метод оптимизации конструкций / О.Е. Гончарова, В.Г. Максимов и др. // Труды Одесского политехнического университета. – 1999. – Вып. 2 (8). – С. 41 – 44.*
  10. *Балан, С.А. Метод виртуального объекта в проектировании / С. А. Балан, Т. П. Становская и др. // Труды Одесского политехнического университета. – 2000. – Вып. 1. – С. 32-35.*
  11. *Становский, А. Л. Метод виртуальной модели в метрологическом обеспечении автоматизированного проектирования и управления / А.Л. Становский, Л.В. Бовнегра и др. // Восточно-европейский журнал передовых технологий. Информационные технологии. – Хар'ков, 2015 – № 2/9 (74). – С. 30-35.*
  12. *Балан, С.А. Применение метода виртуального объекта в машиностроении: тр. VII семинара / С.А. Балан, Т.П. Становская и др. // Моделирование в прикладных научных исследованиях. – Одеса: ОГПУ, 2000. – С. 12-16.*
  13. *Хемди, А. Taxa. Введение в исследование операций. Operations Research: An Introduction / А. Taxa Хемди. – 8 изд. – М.: Вильямс, 2007. – 912 с.*
  14. *Моделювання та оптимізація поліматеріальних об'єктів в САПР за допомогою метода віртуальної моделі / О.Л. Становський, В. ІІ. Хуссаїн, О. Ю. Лебедєва та ін. // Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків, 2017. – № 16(1238). – С. 61-67.*

**Bibliography (transliterated):**

1. *Stanovskaja, T. P. Podveska transportnogo sredstva kak nelinejnyj fil'tr / T. P. Stanovskaja, O. S. Savel'eva i dr. // Materiyali XII seminara «Modelirovanie v prikladnyh nauchnyh issledovanijah». – Odessa: ONPU, 2005. – S. 63-64.*
2. *Stanov's'kij, O. L. Avtomatizovane proektuvannja tehnologii vigotovlennja gumovometalevih virobiv / O. L. Stanovskij, E. Ju. Lebedeva i dr. // Vostochno-europejskij zhurnal peredovyh tehnologij. Processy upravlenija. – Har'kov, 2015. – № 5/1 (77). – S. 23-28.*
3. *Losev, A. K. Teorija i raschet jelektromehanicheskikh fil'trov / A. K. Losev – M.: Svjaz', 1965. – 262 s.*
4. *Pavlov, A. N. Vysokodobrotnyj jelektromehanicheskij fil'tr*

- nizkochastotnyh signalov / A. N. Pavlov // Izmeritel'naja tehnika. – 2003. – № 10. – S. 39-40.
- 5.** Shvets, P. S. The computer-aided design of rubber-metal products / P. S. Shvets, O. Yu. Lebedeva and oth. // Praci Odes'kogo nacional'nogo politehnichnogo universitetu. – Odessa: ONPU, 2015. – S. 63-72.
- 6.** Balan, S. A. Modelirovanie peredatochnyh chastotnyh harakteristik jelementov avtovtransportnyh sredstv / S. A. Balan, T. P. Stanovskaja i dr. // Trudy Odesskogo politehnicheskogo universiteta. – 1999. – Vyp. 3. – S. 71 – 73.
- 7.** Balan, S. A. Metod virtual'nogo ob'ekta v upravlenii tormoznymi sistemami s vnutrennej vibrozashhitoy / S. A. Balan, T. P. Stanovskaja i dr. // Trudy Odesskogo politehnicheskogo universiteta. – 2000. – Vyp. 2. – S.29 – 32.
- 8.** Sidorenko, I. I. Aktivnaja vibrozashhitnaja sistema s mehanicheskoj obratnoj svjaz'ju po velichine peredavaemoj nagruzki / I. I. Sidorenko // Trudy Odesskogo politehnicheskogo universiteta. – 1999. – № 2(8). – S. 51-54.
- 9.** Goncharova, O. E. Nechuvstvitel'nyj k asimmetrii chislennyj metod optimizacii konstrukcij / O. E. Goncharova, V. G. Maksimov i dr. // Trudy Odesskogo politehnicheskogo universiteta. – 1999. – Vyp. 2 (8). – S. 41-44.
- 10.** Balan, S. A. Metod virtual'nogo ob'ekta v proektirovaniy / S. A. Balan, T. P. Stanovskaja i dr. // Trudy Odesskogo politehnicheskogo universiteta. – 2000. – Vyp. 1. – S. 32-35.
- 11.** Stanovskij, A. L. Metod virtual'noj modeli v metrologicheskem obespechenii avtomatizirovannogo proektirovaniya i upravleniya / A.L. Stanovskij, L.V. Bovnegra i dr. // Vostochno-europejskij zhurnal peredovyh tehnologij. Informacionnye tehnologii. – Har'kov, 2015 – № 2/9 (74). – S. 30-35.
- 12.** Balan, S. A. Primenenie metoda virtual'nogo ob'ekta v mashinostroenii: tr. VII seminara / S. A. Balan, T. P. Stanovskaja i dr. // Modelirovanie v prikladnyh nauchnyh issledovanijah. – Odessa: OGPU, 2000. – S. 12-16.
- 13.** Hemdi, A. Taha. Vvedenie v issledovanie operacij. Operations Research: An Introduction / A. Taha Hemdi. – 8 izd. – M.: Vil'jams, 2007. – 912 s.
- 14.** Modeljuvannja ta optimizacija polimaterial'nih ob'ektiv v SAPR za dopomogoju metoda virtual'noi modeli / O. L. Stanov's'kij, V. Sh. Hussain, O. Ju. Lebedeva ta in. // Visnik NTU «HPI», Serija: Mehaniko-tehnologichni sistemi ta kompleksi. – Harkiv, 2017. – No 16(1238). – S. 61-67.

УДК 004.652:001.51

В.О.Яковенко, Одеса, Україна

## ФОРМУВАННЯ ПРОФІЛЮ ПУБЛІКАЦІЙНОЇ ТА ПРОФЕСІЙНОЇ АКТИВНОСТІ НАУКОВЦЯ

Визначено умови для прийняття проектних рішень при створенні проекту інформаційного супроводу процесу ліцензування і акредитації вищих навчальних закладів

**Ключові слова:** Професійна та публікаційна активність, наукометричні бази, дані, ліцензійні умови, результати, проекти, модель

Определены условия для принятия проектных решений при создании проекта информационного сопровождения процесса лицензирования и аккредитации высших учебных заведений

**Ключевые слова:** Профессиональная и публикационная активность, научометрические базы, данные, лицензионные условия, результаты, проекты, модель

*The conditions for the adoption of project decisions are defined for the creation of a project for the information support process of the licensing and accreditation of higher education institutions*

**Keywords:** Professional and publication activity, scientometric databases, data, licensing conditions, results, projects, model

**Вступ.** Оприлюднення результатів досліджень у вигляді бібліометричного портрета (профілю науковця) – це своєрідний звіт фахівця суспільству за надану можливість займатися науковою діяльністю. Тому створення таких портретів слід розглядати як обов'язок вченого.

Профіль науковця, як правило, використовується для ефективного представлення власних наукових публікацій, знаходження нових колег, для визначення рівня наукової (публікаційної), контролю та коригування своїх наукометричних показників.

Автор статті пропонує включити до профілю науковця його не тільки показники його публікаційної, а й показники професійної активності науково-педагогічного працівника (НПП) [1].

Показники для визначення рівня наукової (публікаційної) та професійної активності НПП визначено в ліцензійних умовах провадження освітньої діяльності закладів освіти затверджених постановою Кабінету Міністрів України від 30 грудня 2015 р. № 1187. Всього показників 19, показники 1–3, 14, 18 відносяться до показників публікаційної активності, інші – до показників професійної активності. Відповідність рівням наукової (публікаційної) та професійної активності НПП відображається в звітах НПП, звітах кафедр, структурних підрозділів університетів та зберігається в базах даних для подальшого відображення в ліцензійних та акредитаційних справах [1-2].

**Матеріал та результати дослідження.** Загальне завдання дослідження формулюється як створення проекту інформаційного супроводу процесу ліцензування і акредитації вищих навчальних закладів. Структура системи формується в процесі здійснення її системного аналізу. Структуру системи можна представити у вигляді ієрархічної організації об'єктів і їх взаємодії. Об'єкт вищого рівня включає об'єкти менш високого рівня, створюючи підієрархію, а система як ціле є об'єктом самого верхнього рівня і сукупністю всіх підієрархій.

Сукупність функціональних підсистем становить функціональну частину ІПС. Вона визначає склад, порядок і принципи взаємодії функціональних підсистем для досягнення поставленої перед системою мети функціонування.

Основні принципи декомпозиції – виокремлення самостійних функціональних підсистем – такі: відносна самостійність кожної з підсистем, тобто наявність конкретного об'єкта управління; наявність відповідного набору функцій і функціональних задач з чітко вираженою локальною метою функціонування; мінімальний склад елементів, що входять до системи [3].

Функціональна частина ІПС включає ряд підсистем, що охоплюють рішення конкретних задач планування, контролю, обліку, аналізу і регулювання діяльності керованих об'єктів. Функції ІПС визначають її структуру, що включає процеси (процедури): збору і реєстрації даних; підготовки інформаційних масивів; обробки, накопичення і зберігання даних; формування результатної інформації; передачі даних від джерел виникнення до місця обробки, а результатів (розрахунків) – до споживачів інформації для ухвалення ними відповідних (зокрема управлінських) рішень.

*Збір і реєстрація інформації* в ІПС відбуваються за допомогою програмно-технічних засобів збору і реєстрації інформації, що суміщають операції кількісного вимірювання, реєстрації, накопичення і передачі інформації по каналах зв'язку, введення безпосередньо в комп'ютер для формування потрібних документів або накопичення отриманих даних в системі.

*Передача інформації* здійснюється дистанційною передачею по каналах зв'язку за допомогою інших засобів комунікацій. Дистанційна передача по каналах зв'язку скорочує час передачі інформації і знижує трудомісткість. Проте її здійснення вимагає спеціальних технічних засобів, що здорожує процес передачі.

*Зберігання і накопичення інформації* викликане багатократним її використанням, застосуванням умовно-постійною, довідковою і інших видів інформації, необхідністю комплектування первинних даних до їх обробки. Зберігання і накопичення інформації здійснюється в інформаційних базах у вигляді інформаційних масивів, де дані розташовуються по встановленому в процесі проектування порядку. З цими процесами безпосередньо пов'язаний *пошук даних*, тобто вибірка потрібних даних з інформації, що зберігається, включаючи

пошук інформації, належному її коректуванню або заміні. Процедура пошуку інформації виконується автоматично на основі складеного користувачем або програмою комп'ютера запиту на потрібну інформацію.

*Обробка інформації* проводиться на комп'ютерах децентралізовано, в місцях виникнення первинної інформації, де організовуються автоматизовані робочі місця фахівців (НПП) [4].

Основні компоненти і технологічні процеси ПС, яку необхідно побудувати зображені на рис. 1.12.

Призначення підсистем «Збір даних «Професійна активність НПП»» та «Пошук інформації «Публікаційна активність НПП»» полягає в своєчасному формуванні і видачі достовірної інформації для вироблення і ухвалення управлінських рішень відповідно до ліцензійних умов провадження освітньої діяльності закладів освіти .

Збір даних за «Професійною активністю НПП» проводиться з БД локальної мережі ВНЗ та ЄДЕБО (Єдиної державної електронної бази освіти).

Збір даних за «Публікаційною активністю НПП» проводиться з мережі Інтернет з наукометричних баз даних.

Звіти НПП для формування БД «Професійна активність НПП» вводяться через особистий профіль з функціонального автоматизованого робочого місця кафедри за заздалегідь визначеною формою. Звіти представляються після кожного семестру.

Пошук в наукометричних базах проводиться за запитом адміністратора системи.

Вихідні форми «Відповідність науково-педагогічного працівника ліцензійним умовам», «Відомості про кількісні та якісні показники кадрового забезпечення освітньої діяльності у сфері вищої освіти» та «Якісний склад науково-педагогічних працівників, які забезпечують навчальний процес із спеціальністю» відповідають додатку 3 до Ліцензійних умов.

При організації інших підсистем використовується системний підхід, що забезпечує створення єдиної інформаційної бази; розробку типової схеми обміну даними між різними рівнями системи і усередині кожного рівня; організацію єдиної схеми ведення і зберігання інформації; забезпечення вирішуваних задач початковими даними.

Побудова ПС починається з формування їх логічних структур, що визначають процеси зберігання, передачі і пошуку інформації в системі. Реалізація логічної структури ПС проведено згідно основним принципам автоматизації інформаційних систем: одноразовість введення даних, безперервність інформаційного процесу, диференціація процесів обробки даних в системі і інтеграція подібних систем.

Одноразове введення інформації передбачає розробку і ухвалення технологічних рішень, що дозволяють реалізацію даного принципу з урахуванням уніфікації вживаних в даній системі БД і формату введення.

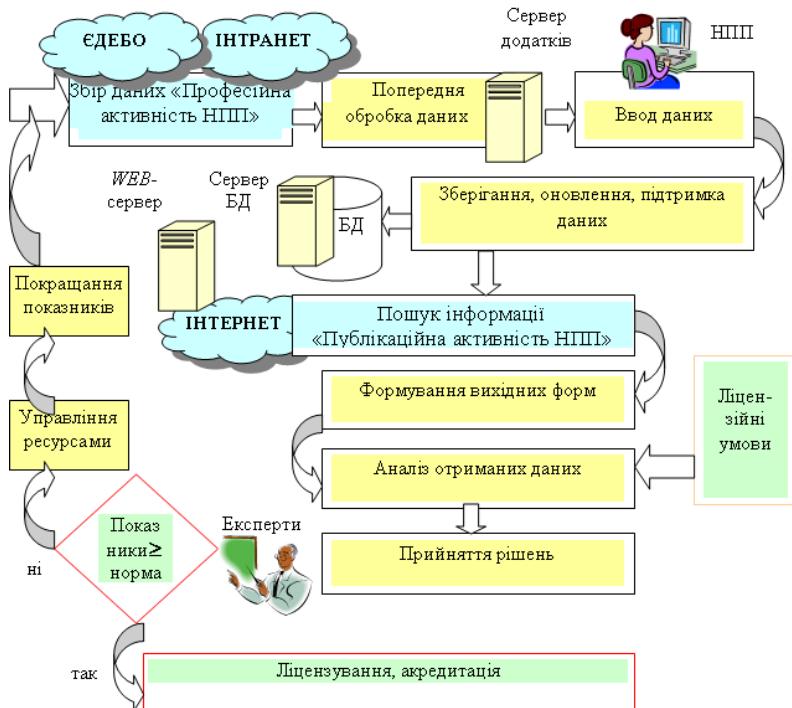


Рисунок 1 – Основні компоненти та технологічні процеси ІПС

*Безперервність інформаційних процесів* означає необхідність виконання системою всіх операцій, пов'язаних з обробкою, зберіганням і видачею інформації користувачам.

*Диференціація процесів обробки інформації* в системі припускає розробку інформаційної технології, орієнтованої на виконання технологічних процесів на окремих функціональних автоматизованих робочих місцях науково-педагогічного працівника.

*Інтеграція інформаційних систем* визначає реалізацію взаємозв'язку різних комп'ютерних технологій і ІПС у єдину мережу.

Оскільки, кількість учасників проекту як зі сторони розробника так і з боку замовника ПС є досить великою та враховуючи факт можливого різного

їх географічного розташування, інструментальні програмні засоби розроблено як *web*-орієнтовані сервіси. Це є однією з важливих переваг CASE-засобів, оскільки вони дають змогу забезпечити віддалену роботу над проектом для всіх учасників проекту.

**Висновки.** У статті запропонована концепція побудови інформаційно-пошукових систем як проекту інформаційного супроводу процесу ліцензування і акредитації вищих навчальних закладів.

Запропоновано структуру, основні компоненти та технологічні процеси спроектованої ПС.

**Список використаних джерел:** 1. Гогунський, В.Д. Особливості цитування наукових публікацій у Інтернет-просторі [Текст] / В.Д. Гогунський, В.О. Яковенко, А.С. Коляда // Шляхи реалізації кредитно-модульної системи. – 2015. – № 10. – С. 28-33. 2. Тарасов, Д. Використання спеціалізованих пошукових систем для отримання показників цитованості електронних наукових архівів [Текст] / Д. Тарасов, О. Гарасим // Комп'ютерні науки та інформаційні технології: [збірник наукових праць] / Вісник Національний університет «Львівська політехніка». – № 732. – 2012. – С. 382-388. 3. Hirsch, J. E. An index to quantify an individual's scientific research output [Текст] / J. E. Hirsch // arXiv: physics/0508025. – v5. – 29 Sep. 2005. – 5 p. 4. Harzing Anne-Wil. The Publish or Perish Book. – Tarma Software Research Pty Ltd, Мельбурн. – 2010. – 266 с. 5. Оборський Г.А. Наукометрические исследования публикационной активности, как составляющая инновационного развития университета [Текст] / Г.А. Оборский В.М. Тонконогий, В.Д. Гогунский // Збірник наукових праць НТУ «ХПІ» «Високі технології в машинобудуванні». – 2014. – № 1. – С. 141-150.

**Bibliography (transliterated):** 1. Gogunskyy, V.D. Osoblyvosti cytuvannia naukovykh publikaciy u Internet-prostori [Tekst] / V.D. Gogunskyy, V.O. Iakovenko, A.S. Koliada // Shliyah realizacii kredytno-modulnoi systemy. – 2015. – № 10. – S. 28-33. 2. Tarasov, D. Vykorystannia specializovannyh poshukovykh system dla otrymannia pokaznykiv cytovanosti elektronnyh naukovykh arhiviv [Tekst] / D. Tarasov, O. Harasym // Kompiuterni nauky ta informaciyni tehnoloohii: [zbirnyk naukovykh prac] / Visnyk Nacionallnyy universyet «Lvivska politehnika». – № 732. – 2012. – S. 382–388. 3. Hirsch, J. E. An index to quantify an individual's scientific research output [Tekst] / J. E. Hirsch// arXiv: physics/0508025. – v5. – 29 Sep. 2005. – 5 p. 6. Harzing Anne-Wil. The Publish or Perish Book. – Tarma Software Research Pty Ltd, Melburn. – 2010. – 266 s. 5. Oborskiy G.A. Naukometricheskie issledovaniya publikatsionnoy aktivnosti, kak sostavlyayuschaya innovatsionnogo razvitiya universitetu [Tekst] / G.A. Oborskiy V.M. Tonkonogiy, V.D. Gogunskiy // Zbirnik naukovih prats NTU «HPI» «Visoki tehnologii v mashinobuduvanni». – 2014. – No 1. – S. 141-150.

УДК 378.147

В.Д. Яковенко, канд. техн. наук, О.І. Куценко,  
Є.О. Яковенко, канд. техн. наук, Херсон, Україна

## ЕКСПЕРТНЕ ОЦІНЮВАННЯ В СИСТЕМАХ УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ У ВИЩИХ НАВЧАЛЬНИХ ЗАКЛАДАХ

Запропоновано модель комплексного експертного оцінювання (ЕО) системи управління якістю (СУЯ) для забезпечення інформаційної підтримки і автоматизації основних функцій з оперативного управління навчальним процесом.

**Ключові слова:** аудит, стандарти ДСТУ ISO, експертне оцінювання, система управління якістю

Предложена модель комплексного экспертного оценивания системы управления качеством для обеспечения информационной поддержки и автоматизации основных функций оперативного управления учебным процессом

**Ключевые слова:** аудит, стандарты ГСТУ ISO, экспертное оценивание, система управления качеством

*The model of complex expert evaluation of the quality management system is proposed to provide information support and automation of the basic functions of operational management of the educational process.*

**Keywords:** audit, standards of DSTU ISO, expert evaluation, control quality system

**Вступ.** За визначенням ДСТУ ISO 19011:2012 «аудит (audit) – це систематичний, незалежний і задокументований процес отримання доказів аудиту та об'єктивного їх оцінювання, щоб визначити ступінь дотримування критеріїв аудиту». Аудити можуть бути внутрішні та зовнішні [1].

Внутрішні аудити (ВА), що їх іноді називають «аудити першою стороною», провадить зазвичай або сама організація або за її дорученням певна особа для критичного аналізування з боку керівництва і для інших внутрішніх цілей (наприклад, щоб підтвердити результативність системи управління чи отримати інформацію для поліпшування системи управління).

Внутрішні аудити можуть бути основою для самодекларування відповідності організації. У багатьох випадках, зокрема, в малих організаціях, незалежність може бути продемонстровано звільненням від відповідальності за діяльність, аудит якої провадять, або відсутністю упередженості та конфлікту інтересів.

До зовнішніх аудитів відносять аудити другою стороною та аудити третьою стороною.

Аудити другою стороною провадять ті сторони, що мають певну зацікавленість у діяльності організації, наприклад, замовники чи інші особи за

їхнім дорученням. Аудити третьою стороною провадять незалежні аудиторські організації наприклад, регуляторні органи чи органи сертифікації [1-2].

**Матеріал та результати дослідження.** В рамках дослідження пропонується розробити проведення аудитів за допомогою експертного оцінювання СУЯ.

У основу структури ЕО СУЯ покладено бельгійсько-нідерландську модель поліпшення якості вищої освіти, заснована на моделі Європейського фонду з менеджменту якості (*EFQM*) [3 - 4], і моделі конкурсу «Системи забезпечення якості підготовки фахівців» [5], які доповнені стандартами і директивами *ENQA*, вимогами і рекомендаціями стандартів серії *ISO 9000:2000*.

Показники групи «Результати» оцінюються за зворотнім зв'язком, і реалізують дії, що приводять в результаті до нових дій і поліпшень. Таким чином, у кожному показнику реалізується цикл Э. Демінга (*Plan-Do-Check-Action*) [4 - 6], тобто процес постійного вдосконалення.

Показники II рівня і складові показників групи «Результати» так само як і показники групи «Можливості» оцінюються за кваліметричними шкалами (рис. 1).

Для оцінки показників рівня і складових з урахуванням перерахованих «вимірювань» розроблені спеціальні кваліметричні шкали. Це дозволяє перейти від якісної оцінки відповідних показників II рівня до їх кількісної оцінки.

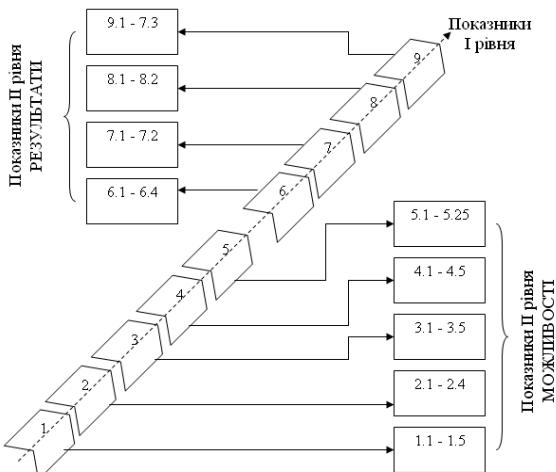


Рисунок 1 – Структура моделі показників для ЕО СУЯ

Показники II рівня і складові показників I рівня групи «Результати» так само як і показники групи «Можливості» оцінюються за кваліметричними шкалами.

Модель автоматизованого управління якістю ВНЗ і кваліметричні шкали покладені в основу методики самооцінки ВНЗ.

Модель в основному вписується в існуючі схеми і показники акредитаційної експертизи, розширяючи і поглиблюючи їх в напрямах, які відповідно до базових принципів *TQM* впливають на якість підготовки фахівців.

При необхідності можна деталізувати показники. Показники повинні відображати якісну оцінку досконалості основних робочих процесів ВНЗ і критеріїв, що забезпечують ефективний менеджмент. Така деталізація може бути зроблена шляхом побудови базової моделі і методики самооцінки (оцінки) СУЯ ВНЗ.

З урахуванням задекларованої моделі визначення якості діяльності ВНЗ пропонується метод, який представляє собою логічний та математичний опис компонентів і функцій, які відображають суттєві властивості модельованого процесу оцінювання якості діяльності ВНЗ (у вигляді узагальненого показника ефективності –УПЕ).

Метод включає (рис. 2):

- вибір і представлення загальної схеми системи;
- визначення збалансованої системи показників;
- формування групи експертів; опис характеристик системи і її складових;
- попереднє ранжування характеристик; визначення компетентності експертів;
- повторне ранжирування характеристик з урахуванням компетентності експертів;
- визначення показника згоди експертів;
- визначення коефіцієнтів значущості окремих показників;
- вибір шкал вимірювань і нормування окремих показників;
- формування шкали бальних оцінок;
- вибір і формування узагальненого показника ефективності;
- визначення індивідуальних і групових внесків приватних показників.

Для визначення узагальненого показника ефективності діяльності НЗ використовується метод експертних оцінок. Одержана в результаті обробки узагальнена думка експертів приймається, як вирішення проблеми.

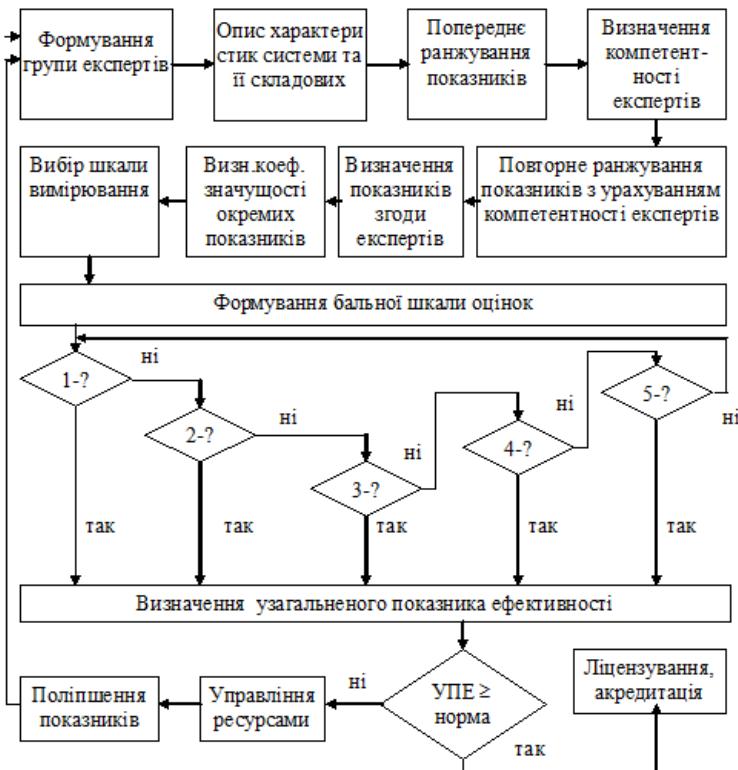


Рисунок 2 – Метод визначення узагальненого показника ефективності

Комплексне використання інтуїції (неусвідомленого мислення), логічного мислення і кількісних оцінок з їх формальною обробкою дозволяє одержати ефективне рішення проблеми.

При виконанні своєї ролі в процесі управління експерти проводять дві основні функції: формують об'єкти (альтернативні ситуації, цілі, рішення і т. п.) і проводять вимірювання їх характеристик (ймовірність звершення подій, коефіцієнти значущості цілей, переваги рішень і т. п.).

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. Пропонується метод взаємних рекомендацій і метод самооцінки для визначення кількості експертів для проведення моделювання.

При формуванні групи експертів основним завданням є визначення її якісного і кількісного складу.

Вибір експертів починається з визначення питань, які охоплюють вирішення даної проблеми, потім складається список осіб, компетентних у цій галузі.

Реалізована ЕО СУЯ побудована на основі сучасної клієнт-серверної архітектури. Бази даних функціонують під управлінням SQL-сервера і розміщені на високопродуктивному серверному устаткуванні. Програмні додатки, які реалізують конкретні задачі, розміщені на сервері додатків.

Призначенні для користувача програмні компоненти реалізовані у формі «товстих клієнтів», що встановлюються і автоматично оновлюються централізовано в інtranet-мережі, і «тонких клієнтів» у вигляді Web-додатків.

Для коректної роботи підсистеми встановлюється та налагоджується сервер бази даних. На сервері повинна міститися база даних, де зберігаються довідники «Експерти» та «Показники», а також відомості про раніше створені проекти. Для роботи з ними також необхідні БД цих проектів.

При проектуванні ЕО СУЯ, архітектура прикладної частини реалізована за модульним принципом, а саме: прикладна компонента побудована як набір клієнтських додатків, які спеціалізуються на реалізації чітко визначеного набору функцій.

Група «товстих» клієнтів використовується в додатках, призначених для забезпечення функціональності, пов'язаної з наданням користувачеві розвиненішого інтерфейсу.

**Висновки.** Створена комплексна ЕО СУЯ на балі моделі експертного оцінювання забезпечує інформаційну підтримку і автоматизацію основних функцій з оперативного управління НП, навчально-методичному управлінні, управлінні якістю освіти, управлінню структурними підрозділами.

Система забезпечує обслуговування приймальної кампанії, облік контингенту студентів, відстеження виконання студентами навчальної програми і моніторинг успішності, нарахування стипендій, облік даних про оплату навчання, формування навчальних планів відповідно до галузевих стандартів і розрахунок навчального навантаження, формування необхідних поточних і звітних документів, обробку оперативних і аналітичних інформаційних запитів.

Інтеграція спеціалізованих прикладних підсистем в єдину систему дозволяє збудувати взаємозв'язані процеси управління НП від складання навчальних планів і розрахунку навантаження, обліку контингенту і ведення особистих справ студентів, через організацію і інформаційне забезпечення звітності, до оперативного контролю їх успішності, аналітичної обробки і інтерпретації даних про освоєння студентами навчальних програм, інтегрованих показників, що характеризують якість реалізації НП за конкретними освітніми програмами.

Запропонована таким чином модель ЕО СУЯ дозволяє, здійснити кількісно-якісне оцінювання СУЯ ВНЗ, що сприяє активізації його самовдосконалення та саморозвитку.

**Список використаних джерел:** 1. Підгаєць П., Бригілевич І. Система управління якістю як інструмент вдосконалення діяльності органу місцевого самоврядування. Метод.посібник / [Підгаєць П., Бригілевич І. – К.]; Швейцарсько-український проект «Підтримка децентралізації в Україні – DESPRO». – К. : ТОВ «Софія-А». – 2012. – 134 с. 2. ДСТУ ISO 9001:2015 “Системи управління якістю. Вимоги (ISO 9001:2015, IDT)” 3. Розвиток системи забезпечення якості вищої освітів Україні: інформаційно-аналітичний огляд / Укладачі: Добко Т., Золотарєва І., Калашинікова С., Ковтунець В., Курбатов С., Линьова І., Луговий В., Прохор І., Ращевич Ю., Сікорська І., Таланова Ж., Фініков Т., Шаров С.; за заг. ред. С. Калашинікової та В. Лугового. – Київ : ДП «НВЦ «Приоритет», 2015. – 84 с., 4. Моделі та методи експертного оцінювання рівня корпоративних знань для прийняття проектних рішень. Яковенко Є. О. Канд. дис., спец. 05.13.22 – Управління проектами та програмами. Одеський національний політехнічний університет, дата захисту дисертації: 30.06.15, 134 стор. 5. Моделі та методи створення інформаційної технології для управління якістю діяльності навчального закладу Яковенко В. Д. Канд. дис., спец. 05.13.06 Одеський національний політехнічний університет, дата захисту дисертації: 02.06.09, 134 стор. 6. Яковенко О.Є., Гогунський В.Д., Тонконогий В.М. Наукові основи контролю знань при реалізації кредитно-модульної системи навчання. // Збірник наукових праць НТУ «ХПІ» «Високі технології в машинобудуванні». – 2005. – № 2. – С. 447-450.

**Bibliography (transliterated):** 1. *Pidhaiets P., Bryhilevych I.* Systema upravlinnia yakistiu yak instrument vdoskonalennia diialnosti orhanu mistsevoho samovriaduvannia. Metod.posibnyk / [Pidhaiets P., Bryhilevych I. – K.]; Shveitsarsko-ukrainskyi proekt «Pidtrymka detsentralizatsii v Ukrayini – DESPRO». – K. : TOV «Sofia-A». – 2012. – 134 s. 2. DSTU ISO 9001:2015 “Systemy upravlinnia yakistiu. Vymohy (ISO 9001:2015, IDT)” 3. Rozvytok systemy zabezpechennia yakosti vyshchoi osvity v Ukrayini: informatsiino-analitychnyi ohliad / Ukladachi: Dobko T., Zolotarova I., Kalashnikova S., Kovtunets V., Kurbatov S., Lynova I., Luhovyi V., Prokhor I., Rashkevych Yu., Sikorska I., Talanova Zh., Finikov T., Sharov S.; za zah. red.S. Kalashnikovoї ta V. Luhovoho. – Kyiv : DP «NVTs «Prioritet», 2015. – 84 s., 4. Modeli ta metody ekspertnoho otsiniuvannia rivnia korporatyvnykh znan dla pryiniattia proektnykh rishen. *Yakovenko Ie. O.* Kand. dys., spets. 05.13.22 – Upravlinnia proektamty ta prohramamy. Odeskyi natsionalnyi politekhnichnyi universyet, data zakhystu dysertatsii: 30.06.15, 134 stor. 5. Modeli ta metody stvorennia informatsiinoi tekhnolohii dla upravlinnia yakistiu diialnosti navchalnogo zakladu *Yakovenko V. D.* Kand. dys., spets. 05.13.06 Odeskyi natsionalnyi politekhnichnyi universyet, data zakhystu dysertatsii: 02.06.09, 134 stor. 6. *Yakovenko O.Ye., Goguns'kyy V.D., Tonkonogyy V.M.* Naukovyi osnovy kontrolyu znan' pry realizatsiyi kredytno-modul'noyi sistemy navchannya. // Zbirnyk naukovykh prats' NTU «KhPI» «Vysoki tekhnolohiyi v mashynobuduvanni». – 2005. – No 2. – S. 447-450.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Ищенко Г.И.</b> Определение особенностей и рациональных условий шлифования лопаток турбин из титанового сплава.....	3
<b>Алексенко Б.А.</b> Системы измерения напряженности электромагнитного поля в объеме камеры СВЧ.....	10
<b>Борисенко И.И.</b> Графовая модель представления стеганоконтейнера и анализ состояния его защищенности.....	25
<b>Гуцаленко Ю.Г.</b> Заметки по истории, систематике и моделированию прорезных пружин .....	34
<b>Евтифеев С.Л., Крушельницкий Д.О.</b> Разработка износостойкого сплава на основе системы Fe-Si-Cu-C .....	48
<b>Кальченко В.В., Венжега В.І., Литвин О.О., Кальченко Д.В.</b> Дослідження процесу двостороннього шліфування торців штовхача з різними діаметрами зі схрещеними осями кругів з плоскими торцями та деталей .....	59
<b>Криворучко Д.В., Евтухов В.Г., Чижов И.Г.</b> Оценка обрабатываемости конструкционных материалов резанием .....	69
<b>Куценко О.І., Романь Н.В., Яковенко О.Є.</b> Проектування систем управління якістю на основі міжнародних та національних стандартів .....	79
<b>Ларин В.П., Лищенко Н.В.</b> Мониторинг и технологическая диагностика на станках с ЧПУ .....	86
<b>Лебедев В.Г., Луговская Е.А., Овчаренко А.В.</b> Экспериментальное исследование процесса шлифования мартенситно-стареющей стали, H18K9M5T .....	99
<b>Носов П.С., Яковенко О.Є., Тонконогий В.М.</b> Проектування модульного корсету для лікування сколіозу з використанням засобів 3D моделювання.....	109
<b>Петрусенко Л.А., Антонюк В.С.</b> Анализ разрушения твердосплавного инструмента при врезании .....	116
<b>Симонова А.А.</b> Оцінка циклічної міцності субмікрокристалічної сталі СТ20 .....	125

<i>Сліпчук А.М., Яким Р.С.</i> Покращення якості технології процесу запресовування зубків у шарочки бурових доліт .....	134
<i>Становский А.Л., Науменко Е.А., Абу Шена Осама</i> Математическое моделирование и оптимизация в САПР равнонапряженных деталей машин .....	143
<i>Стрельчук Р.М.</i> Качество поверхностного слоя твердосплавных режущих инструментов из наноразмерных зерен монокарбида вольфрама после алмазно-искрового шлифования .....	155
<i>Швець П.С., Торопенко А.В., Хуссаін В.ІІ., Коцулян С.М.</i> Оптимальне проектування композиційних деталей машин .....	161
<i>Яковенко В.О.</i> Формування профілю публікаційної та професійної активності науковця .....	173
<i>Яковенко В.Д., Куценко О.І., Яковенко Є.О.</i> Експертне оцінювання в системах управління якістю у вищих навчальних закладах .....	178

Наукове видання

## **Високі технології в машинобудуванні**

Збірник наукових праць

Упорядник *проф. Грабченко А. І.*

Оригінал-макет *Крюкова Н. В.*

В авторській редакції

Матеріали відтворено з авторських оригіналів

Підп до друку 31.08.2017 р. Формат 60 × 84 1/16. Папір офсетний.  
Riso-друк. Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 11,0. Наклад 300 пр., 1-й з-д 1–20.  
Зам. № 149. Ціна договірна.

---

Виготовлювач Видавничий центр НТУ «ХПІ»,  
вул. Фрунзе, 21, м. Харків-2, 61002

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3657 від 24.12.2009 р.