

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

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

СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ В МАШИНОБУДУВАННІ

MODERN TECHNOLOGIES OF ENGINEERING

**Збірник наукових праць
Printed scientific works**

Видається з 2008 року

Випуск 4

Харків НТУ «ХПІ» – 2010 – Kharkiv NTU «KhPI»

ББК 34.63

С 56

УДК 621.91

Державне видання

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

Друкується за рішенням Вченої Ради НТУ "ХПІ",
протокол № 6 від 06.07.2010 р.

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

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

Сучасні технології в машинобудуванні [Текст]: зб. наук. праць. –
С56 Вип. 4. / редкол.: В. О. Федорович (голова) [та ін.]. – Харків :
НТУ «ХПІ», 2010. – 312 с. – Укр., рос., англ. мовами.

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

Для науковців, викладачів вищих навчальних закладів, промисловців.

ББК 34.63

© Національний технічний університет «Харківський
політехнічний інститут», 2010

К. А. ЗВОРЫКИН – ОСНОВОПОЛОЖНИК ТЕОРИИ РЕЗАНИЯ МЕТАЛЛОВ

**(Первый профессор механической технологии Харьковского
технологического института)**

Константин Алексеевич Зворыкин родился 25 марта 1861 г. в Муроме, в семье мукомолов, работавших по этой специальности из рода в род.

В 1879 г. он успешно окончил Московскую 3-ю классическую гимназию. В том же году Константин Алексеевич поступил в Петербургский технологический институт, где обучался в течение пяти лет. Ученик целой плеяды блестящих профессоров – Афанасьева, Кирпичева, Вышнеградского и других, К. А. Зворыкин оценил широкую энциклопедичность высшего технического образования, свойственную многим русским ученым того времени. Подобно И. А. Тиме, он на всю жизнь стал приверженцем универсальности технических знаний. По его собственному выражению, он только наполовину принадлежал мукомольному делу, а наполовину – механической технологии вообще.

Окончив в 1884 г. институт, Константин Алексеевич несколько лет работал в области конструирования морских и речных судов. К. А. Зворыкин часто вспоминал об этом с особым удовлетворением и сожалел, что не смог дальше работать в том же направлении.

Уже в ранний период своей практической деятельности К. А. Зворыкин – автор проекта и строитель одного речного и одного морского пароходов – получил известность как талантливый конструктор.

1687-1688 гг. К. А. Зворыкин заведовал Болдинским механико-бондарным заводом в г. Астрахани. Тогда же Константин Алексеевич начал сотрудничать в «Нижегородском вестнике пароходства и промышленности». В 1888 г. в № 5 этого журнала появилась первая печатная работа К. А. Зворыкина «Определение веса моргановских колес», в № 8 – «Вертикальная форсунка Зворыкина», затем в № 12 – «Определение диаметра и приблизительного веса трубчатого цилиндрического котла». В том же «Нижегородском вестнике» опубликована работа «Способ опытного определения коэффициента полезного действия и других величин, характеризующих судовые двигатели», а затем «Формовка по шаблону гребного винта» (1890 г.). В 1892 г. в № 3 и 4 была помещена статья «Способ понтонного грузового пароходства».

Эти работы уже тогда позволяли угадать в их авторе будущего недюжинного экспериментатора и ученого.

Конструкторская деятельность и первые печатные работы К. А. Зворыкина привлекли внимание его бывшего учителя по Технологическому институту в Санкт-Петербурге проф. В. Л. Кирпичева, который был организатором и первым директором Харьковского практического технологического института.

В 1888 г. Виктор Львович Кирпичев пригласил его в качестве адъюнкт-профессора на работу в Харьковский технологический институт. Это положило начало целенаправленной и плодотворной научной работе Константина Алексеевича Зворыкина в области механики и первым ее результатом, явившимся серьезным теоретическим вкладом в отечественную и мировую науку о резании материалов, была монография «Работа и усилие, необходимые для отделения металлических стружек», вышедшая в 1893 г.

Эта работа выдвинула К. А. Зворыкина в плеяду пионеров-основоположников науки о резании материалов и закрепила за ним приоритет в теоретической разработке данного направления в России и в мире. Работа была высоко оценена современниками и К. А. Зворыкин получил за нее премию от Русского технического общества.

По проблемам технологии резания у К. А. Зворыкина имеются также исследования, обобщенные им в книге «Курс механической технологии дерева», вышедшей в 1894 г. Таким образом, 1888-1894 гг. явились основополагающими в научном творчестве К. А. Зворыкина по вопросам обработки и резания материалов.

В 1894 г. К. А. Зворыкин стал первым профессором механической технологии в ХТИ.

В 1893 г. И. А. Тиме высоко оценил работу своего последователя, указав, что небольшая по объему книга К. А. Зворыкина богата по содержанию. В ней автор излагает теорию строгания ясно и просто, дает подробное описание опытов, проведенных им на строгальном станке в механической мастерской Харьковского технологического института.

И далее И. А. Тиме подчеркивает, что «все выводы эти оригинальны и заслуживают самого серьезного внимания, ... настоящая книга представляет драгоценный вклад в техническую литературу и служит прекрасным дополнением к целому ряду достойных трудов, выпущенных в

свет в недавнее время молодыми профессорами Харьковского технологического института».

Оставаясь верным принципу энциклопедичности технического образования и продолжая сотрудничать в «Нижегородском вестнике», Константин Алексеевич одновременно с работой над сочинением «Работа и усилие, необходимые для отделения металлических стружек» упорно трудится над созданием курсов «Механическая технология дерева» и «Мукомольное производство». Его неиссякаемая энергия поражает. Уже в 1894 г. эти капитальные труды Зворыкина выходят в свет. Курс «Мукомольное производство» вскоре стал настольной книгой для изучающих технологию зерна. После трудов проф. Афанасьева в области мукомольного дела не появлялось более выдающихся работ. Это сочинение Константина Алексеевича также было премировано.

В тот же период К. А. Зворыкин принимал участие в работе Харьковского отделения Русского технического общества. Его мысль работала над созданием нового, совершенного типа двигателя внутреннего сгорания. 20 ноября 1894 г. на заседании совета отделения Русского технического общества он сделал доклад «О новом источнике движущей силы». В этом докладе проф. К. А. Зворыкин предложил изменить принцип действия и устройства двигателей внутреннего сгорания, дав принципиальную схему нового двигателя.

В Харьковском технологическом институте деятельность К. А. Зворыкина была весьма разносторонней. Он читал лекции по мукомольному производству и технологии дерева, руководил специальным проектированием по паровым котлам на механическом и химическом отделениях.

Потомственный мукомол, К. А. Зворыкин был с детства знаком с практикой разрушения материалов, получив эстафету от выдающихся ученых – Кирпичева, Афанасьева, Вышнеградского. Талант инженера-изобретателя в сочетании с этими научными направлениями позволили К. А. Зворыкину осуществить глубокий технологический прорыв в области механики разрушения, посвятив основные исследования наиболее актуальным для практики конца XX в. темам – резанию металлов и дерева.

Основываясь на анализе работ французского исследователя Жосселя (1862-1864 гг.), немецкого ученого Гартихга (1873 г.), а также Вибе, Харта, Треске (1873 г.) и теоретических исследованиях российских ученых Афанасьева, Гадолина, Тиме. Константин Алексеевич Зворыкин

справедливо полагал, что теоретические изыскания и экспериментальные работы, начатые с середины XIX в. специалистами разных стран в области определения усилий и работы, необходимой для отделения стружек материалов, не только не были исчерпывающими, но даже не представляли достаточно объективных научных результатов. Уже в первых строках своего труда он писал: «В научном же отношении вопрос о работе, необходимой для снятия стружек, вопрос о зависимости работы от поперечного сечения стружки и другие остаются до сих пор не вполне решенными, и требуют ответа многие неразъясненные явления и противоречия наблюдателей».

К. А. Зворыкин сумел в самом начале исследования определить причины необходимости результатов исследователей, теоретиков и экспериментаторов. Главную методологическую ошибку своих предшественников он усмотрел в противоречии между вероятностным характером природы возникновения «вредных сопротивлений» и попыткой установления постоянного значения величины сопротивления резанию при определении ее на холостом ходу станков. Кроме того, каждый из них имел собственное представление о вероятностной картине разложения сил.

Этот принципиальный вывод представляется актуальным и в настоящее время, когда речь идет о корректности экспериментальных исследований в данной области техники.

Здесь совершенно уместно ироническое замечание К. А. Зворыкина: «Таким образом, для определения одного неопределенного вопроса вводился другой вопрос, еще более темный, – вопрос сопротивления движению рабочего станка, который всей своей массой неопределенности совершенно затемнял смысл полученного результата и разных исследователей приводил иногда к различным выводам».

Из данной цитаты следует, что в своем понятийном аппарате К. А. Зворыкин вплотную приблизился к оперированию понятиями степени неопределенности, т.е. – энтропии, природа которой рассмотрена гораздо позже в теории информации, разработанной Р. Шенноном в 20-е годы XX в.

Далее К. А. Зворыкин отмечает необходимость учета работы станков, а, следовательно, и эксплуатации рабочих органов в условиях, резко отличающихся (в 5-6 раз) от нормальных и наивыгоднейших (т.е. от оптимального режима). Опираясь, очевидно, на свои опытные данные, полученные в механических мастерских Харьковского технологического института, он считает, что КПД современного ему станкостроительного

парка колеблется от 0,6 (номинальный или по словам К. А. Зворыкина – нормальный режим) до 0,15 в экспериментальных условиях (но вполне вероятных для эксплуатации). «Для исследования явления во всей полноте необходим учет именно этого диапазона КПД, близких к реальным условиям эксплуатации. Это – второй, очень важный момент в принципах подхода к решаемой задаче».

Третьим моментом в его рассуждениях является мысль о законе распределения погрешностей измерений и получения данных исследований, непосредственно влияющих на выводы исследователей в случае учета первых двух моментов, а также увеличения количества экспериментов (два измерения для определения одного значения).

Поскольку теория погрешностей тогда отсутствовала, еще не был разработан математический аппарат, позволяющий найти оптимальное количество измерений при определенных методах математической обработки экспериментальных данных, то К. А. Зворыкин интуитивно подошел к пониманию необходимости введения количества измерений, отличных от одного.

Кроме того, он обращает внимание на неопределенность действия различных органов станка и их взаимодействия, которые не могут быть все учтены исследователем.

Ввиду этих объективных моментов, отражающих вероятностный характер резания на металлообрабатывающих станках, становятся совершенно ясными причины расхождения результатов и «нужно удивляться верному и опытному глазу исследователей, которые при таких неточных приемах наблюдения сумели уловить закономерность явления» и дать к тому времени значительные результаты. Последнее объясняется большим практическим опытом и интуицией всех предшественников К. А. Зворыкина.

Установив основные причины рассогласования результатов в трудах ученых, работавших до него, К. А. Зворыкин дал краткий, но емкий критический анализ работ своих предшественников и пришел к важным выводам, предопределившим поиск исследователей в XX в.

Он писал: «... явление отделения стружек хотя само по себе состоит из ряда простых явлений сопротивлений, но этот ряд довольно полон, и все почти ряды сопротивлений здесь так спутаны и связаны, что выразить все это во всей полноте языком математического анализа весьма затруднительно, по крайней мере до тех пор, пока не будет уяснена вполне

зависимость между простыми рядами сопротивлений. Кроме сказанного затруднение заключается в том, что все изучаемое явление всецело входит в область сопротивления металлов далеко за пределами упругости, в область, которая для нас до сих пор закрыта завесой. Поэтому я вправе полагать, что полное теоретическое обследование явления отделения стружек и выражение усилия и необходимой работы без употребления сдобривающих коэффициентов представляется задачей будущего, в настоящее же время, думается, достаточно удовольствоваться приближенным решением вопроса с выяснением, где возможно, действующих в этом процессе хотя бы главных деятелей».

В работе К. А. Зворыкина явление отделения стружки рассматривается с физической точки зрения, а также с точки зрения условий параметров режущего инструмента и силы, обуславливающих это явление.

По мнению К. А. Зворыкина явление отделения стружки должно происходить следующим образом: металл сминается под воздействием резца, при достижении сопротивления смятию определенного предела происходит скалывание элемента стружки; продвигаясь далее, резец начинает новый процесс смятия до скола второго элемента.

Основной интерес представлял раздел «Выражение усилия и работы, необходимой для снятия стружки», в котором он делает попытку найти теоретически математические выражения определения величины силы и работы резания с учетом сил трения, возникающих от скольжения стружки по поверхности передней грани резца и от скольжения самого резца по обрабатываемой поверхности. Эта задача решается применительно стружки скалывания.

И вновь, отчетливо видя пределы возможного, К. А. Зворыкин объясняет, почему можно решить пока только эту проблему: «Так как решение вопроса относительно стружек изгиба (сливных) за пределами упругости без чересчур смелых предположений весьма сложно и так как в металлах трудно встретить чистые типичные стружки изгиба, то я останавливаюсь на рассмотрении только одного случая скалывания, как наиболее простого для решения. Останавливаюсь на таком решении, тем более что при теоретическом решении вопроса все равно не придется объять явления во всей полноте и для достоверности необходимо будет сравнивать полученные результаты теории с данными наблюдений, которые укажут, насколько мы были правы, принимая свое решение».

Вывод формулы для усилия резания и работы К. А. Зворыкин производит из условий равновесия резца в момент, когда начинается скалывание элемента. Учет сил трения при этом был шагом вперед по сравнению с предшествующими работами.

Все свои опыты К. А. Зворыкин, как и Тиме, проводил на строгальном станке. Для измерения усилий резания непосредственно на резце он впервые применил сконструированный им гидравлический динамометр, который был изготовлен в мастерских при физическом кабинете Харьковского технологического института. Принцип построения такого прибора им был предложен в начале 1890 г. для определения сопротивления поезду, затем он разработал чертеж динамометра, приспособленного к строгальному станку. Прибор был изготовлен в конце того же года. После К. А. Зворыкина гидравлические динамометры прочно вошли в практику исследований динамики сил резания.

Экспериментальным путем он установил влияние толщины снимаемого слоя и угла резания на удельное давление резания и доказал, что расход работы на отделение единицы массы стружки зависит от величины параметров стружки.

Анализируя механику сил, действующих в процессе резания на стружку и режущий орган, и учитывая при этом силы трения у передней и задней поверхностей резца, К. А. Зворыкин теоретическим путем определил положение площади скалывания, открытое Н. А. Тиме.

Глубокие исследования К. А. Зворыкина были весьма актуальны по своей методике и концентрации научных идей даже спустя много лет. Неоднократно на протяжении этого периода в разных странах ученые приходили к тем же результатам.

Деятельность К. А. Зворыкина наиболее ярко представил В. Л. Кирпичев, характеризуя его для назначения профессором КПИ и на должность декана механического отделения в июне 1898 г., имея ввиду всю разнообразную научную, экспериментальную и преподавательскую деятельность К. А. Зворыкина.

1898 г. июня 28. Из отношения директора КПИ в Департамент торговли и мануфактур о кандидатуре К. А. Зворыкина на должность декана механического отделения КПИ.

Имею честь просить Департамент не отказаться ходатайствовать перед господином министром финансов о назначении профессором вверенного мне института и исправляющим должность декана

механического отделения института с соответствующим содержанием с 1 сентября сего года профессора Харьковского технологического института инженера-технолога Зворыкина.

В дополнение к сему имею честь доложить относительно Г. Зворыкина, что он представляет собою выдающегося знатока по механической специальности, обратившего на себя внимание специалистов многочисленными своими работами. Наиболее капитальной из них представляется обширное экспериментальное и теоретическое исследование усилий и работы при снятии стружек, за которое автор удостоен премии наследника цесаревича, учрежденной при Императорском русском техническом обществе. Г. Зворыкин весьма искусный и талантливый конструктор, умеющий руководить проектированием машин студентами так, чтобы развивать их конструкторские способности и научать их самостоятельному проектированию, а не простому лишь кодированию существующих образцов. Эти качества Г. Зворыкина в высшей степени важны для целей механического отделения института, которое, имея в виду развитие машиностроения в нашем отечестве, должно готовить самостоятельных конструкторов, творцов новых типов машин, так как при исключительном подражании иностранным образцам русское машиностроение не в состоянии конкурировать с иностранными заводами.

Умение организовать работу коллектива, сплотить людей на решение наиболее актуальных задач было характерной чертой Константина Алексеевича, которую В. Л. Кирпичев особенно ценил за 10 лет совместной плодотворной работы в Харькове.

Вся экспериментальная и теоретическая работа была проведена под доброжелательным и заинтересованным наблюдением В. Л. Кирпичева и при его непосредственном содействии в изготовлении динамометра, предоставленного для проведения опытов в своей лаборатории.

К. А. Зворыкин работал в тесном контакте и при большой помощи коллектива ХТИ. И словом, и делом помогали ему Александр Константинович Погорелко и Николай Петрович Каблуков.

Владимир Александрович Кнаббе также содействовал К. А. Зворыкину. В его мастерских находилось оборудование – строгальный станок на котором и проходили все испытания. Совместно с Константином Алексеевичем работали В. А. Темилин, А. В. Гуров, А. П. Лидов, В. П. Курило, проводя многочисленные эксперименты в поисках закономерностей процесса резания.

Сам поиск и эксперименты были трудными. Хотя заслугу К. А. Зворыкина в идее использования гидравлического динамометра трудно переоценить, все же сам динамометр являлся далеким от совершенства. Очень велики были силы трения внутри прибора, а применение шарового деревянного подшипника не служило оправданием в данном случае. Поэтому кривая индикатора динамометра отражена скачкообразно на диаграммах, представленных в данной работе. В целом конструкция динамометра была громоздкой, он обладал низкой начальной чувствительностью.

В период опытов динамометр устанавливали вместо суппорта на строгальном станке так, что ось поршня занимала вертикальное положение. Получаемая диаграмма выражала работу, израсходованную на снятие стружки во время каждого прохода резца. В течение основных опытов применяли резцы с прямолинейным режущим лезвием – «теоретические резцы», как их называл тогда Зворыкин. По форме они были подобны отрезным резцам, для строгания отбирали специальные эталонные слитки из чугуна, бронзы, сварочного железа и мягкой стали.

В металлических плитках предварительно прострагивались канавки для того, чтобы резец проходил только своей основной кромкой по выделенным технологическим полосам (плоскостям). Таким образом, устранив, по словам К. А. Зворыкина «сопротивление с боков», было обеспечено так называемое свободное резание».

В процессе экспериментов самым тщательным образом при жестком контроле К. А. Зворыкина проверяли правильность заточки и установки резцов, параметров снимаемой стружки, чтобы полностью исключить возможность погрешностей из-за подобных субъективных ошибок.

Проведенные К. А. Зворыкиным опыты о влиянии скорости на усилие резания в довольно узком диапазоне (1,2-2,6 м/мин) не позволяли сделать определенных выводов о характере этих зависимостей, естественно, имевших небольшую величину (до 10 %). Поскольку сама погрешность опытов, по мнению Константина Алексеевича, составляла 15 %, т. е. превышала зависимость от скорости, влияние ее пришлось сводить к минимуму и все дальнейшие испытания велись на самой минимальной скорости, что явилось еще одним существенным ограничением к изложенным и введенным К. А. Зворыкиным теоретически сразу.

Поэтому стол строгального станка приводился в движение вручную, а постоянную минимальную скорость обеспечивало специальное рычажное устройство.

Первоначально К. А. Зворыкин стремился выяснить экспериментальным путем влияние площади среза при постоянной толщине стружки и переменной ширине. Полученные результаты показали, что работа пропорциональна объему снятых стружек, следовательно, усилия возрастают пропорционально сечению стружки.

При изменении только толщины и неизменной ширине работа оказалась непропорциональной изменению сечения стружки.

Проведенные опыты дали основание К. А. Зворыкину сделать выводы о том, что «... среднее давление на единицу площади или работа на единицу веса (массы) отдельных стружек не есть величина постоянная, а, напротив, переменная и уменьшается с увеличением толщины стружки».

Результаты экспериментов в этом направлении были сведены в многочисленные таблицы (230 опытов по изменению толщины стружки в пределах 0,11-3,69 мм при ширине среза 5 и 10 мм). Затем табличные данные были использованы при построении диаграммы в простых координатах, где по оси абсцисс откладывали толщину стружек, а по оси ординат – средние давления в килограммах.

Анализ полученных графиков показал, что они выражают одну и ту же закономерность – изменение давления в зависимости от толщины стружек. Это позволило подыскать соответствующее математическое выражение для выявленной зависимости.

Однако последующие математические выражения не соответствовали физической сущности процессов, были подобраны искусственно и уже позднее Челюсткиным была найдена причина несоответствия опытных данных и математических выражений для хрупких металлов.

Эта ошибка объяснялась не совсем удачным подбором математической зависимости к кривым графиков, что зачастую случается при использовании метода проб (попыток).

Перенеся все действующие силы в одну точку режущего лезвия резца, Зворыкин составил условие его равновесия, и, пренебрегая образовавшимися при этом парами, получил уравнение алгебраических сумм проекций на вертикальную и горизонтальную оси.

Далее, по мнению Зворыкина, которое ему кажется правдоподобным, хотя и не доказанным специальными исследованиями,

проекции сил и направление, перпендикулярное плоскости скалывания, производят в то же время нормальное давление, которое должно препятствовать возникающим трением относительному передвижению скалываемых элементов стружки, что должно в конечном итоге увеличивать общее сопротивление скалыванию.

Теоретическое определение положения плоскости скалывания и теоретический вывод выражения для усилия резания были сделаны им впервые в истории развития теории резания металлов и явились ценнейшим вкладом в науку.

Далее К. А. Зворыкин произвел теоретическое определение среднего усилия и удельной работы резания для того, чтобы подойти к решению этого вопроса. Он обрисовывает процесс отделения стружек «близким к истине» образом, «вначале давление на металл со стороны резца равно нулю, но постепенно это давление начинает возрастать по мере того, как резец вдавливается в металл. Наконец, когда сопротивление смятию возрастает до того предела, который нужен для скалывания элемента по плоскости АВ, то элемент I начнет скалываться, перемещаясь по плоскости АВ и в то же время продвигаясь по передней грани резца».

Далее К. А. Зворыкин выражает графически работу, необходимую для отделения элемента стружки такой толщины срезаемого слоя, при котором только что начинают получаться вполне разделенные элементы стружки.

Анализируя это выражение, он отмечает, что среднее давление P_0 уменьшается с увеличением толщины стружки.

В 1900г. К. А. Зворыкин издал курс “Детали машин”, который он незадолго до издания начал читать на механическом отделении.

В этот период были напечатаны и другие его интересные работы. Так, в 1900 г. в "Записках Киевского отделения Русского технического общества" помещена статья "О ветряном двигателе П. Гдешинского", в 1902 г. в "Известиях Южно-Русского общества технологов" – работа "Мелкие стальные отливки из печи Piat", а в 1903 г. в "Известиях" этого же общества – весьма интересная статья "Расход работы на вращение приводного вала или трансмиссии".

За все время своей научно-исследовательской и педагогической деятельности в Харьковском и Киевском институтах К. А. Зворыкин не прерывал связи с практикой, являясь консультантом и экспертом в различных учреждениях и производственных предприятиях, был проектантом мельниц и других сооружений.

По его проектам и под его непосредственным руководством были построены мельницы, из которых наиболее крупные – в Харькове, Ахтырке и Старо-Константинове.

Директором Киевского политехнического института К. А. Зворыкин был недолго. В 1905 г. он вышел в отставку и переехал в Харьков, где работал в Харьковском городском самоуправлении.

Но К. А. Зворыкин не прекращал своей научно-исследовательской работы. К этому периоду относится ряд научных работ на самые разнообразные темы.

В марте 1910 г. Константин Алексеевич прочитал на собрании членов Южно-Русского общества технологов доклад на тему "Цементация железа газом", который был впоследствии опубликован.

Победа советской власти на Украине привлекла на сторону народа лучших представителей интеллигенции. В их числе активное участие в советском строительстве принимал К. А. Зворыкин, огромный опыт которого помогал в решении срочных и важных вопросов.

С 1919 по 1924 гг. К. А. Зворыкин работал консультантом в Киевском губкоме, а затем в Укрмуте (Мукомольный трест).

В 1921 г. Константин Алексеевич вновь возвратился к профессорской деятельности в Киевском политехническом институте, однако вследствие закрытия в институте кафедры мукомольного производства в 1925 г. К. А. Зворыкин начал руководить научно-исследовательской кафедрой механической технологии.

В 1923 г. в "Журнале мельничной техники и промышленности" была помещена статья Зворыкина "Эволюция мукомольного дела в современных условиях", а в 1924 г. в том же журнале – статья "Научная организация труда и производства в мукомольном деле".

В 1925 г. Константин Алексеевич поместил в журнале "Хлебное и мукомольное дело СССР" статью "Новая, усовершенствованная конструкция триеров".

К. А. Зворыкин умер 7 июля 1928 г. в Киеве после тяжелой болезни на 68 году жизни.

В своей разносторонней практической, научной и педагогической деятельности К. А. Зворыкин был, прежде всего, ученый-патриот, тесно связанный с народом, инженер, высоко ценивший практику. Неподкупность и глубокая искренность в науке и практике – таковы его отличительные черты.

Как педагог К. А. Зворыкин воспитал целую плеяду русских инженеров-технологов. Константин Алексеевич с большой любовью относился к своим ученикам, воспитывал в них лучшие качества инженера.

Своей многогранной научной деятельностью К. А. Зворыкин внес огромный вклад в сокровищницу мировой науки и техники, являясь одним из основоположников науки о резании металлов и технологии мукомольного производства. Его имя заслужено ставится рядом с именами таких ученых, как И. А. Тиме, П. А. Афанасьев и др.

Со времени К. А. Зворыкина большой и сложный путь прошла наука о резании материалов как физическая основа технологий механической обработки. Несравненны технологические возможности современного многокоординатного станочного оборудования, предельные скорости резания, уникальные свойства инструментальных материалов, в том числе сверхтвердых, точность обработки, тяготеющая к нанометровому диапазону, возможность моделировать и изучать на моделях различные стороны процессов обработки в виртуальном мире – это и многое другое создает надежную основу современных технологий изготовления, о которых прозорливо писал В. Л. Кирпичев: «Только технология может доставить людям средство жить, а потому чем дальше, тем больше и теснее она будет связана со всем происходящим в обществе людей».

*Редколлегия сборника научных трудов
"Современные технологии в машиностроении"*

Статья составлена на основе публикаций:

1. Развитие техники резания материалов на Украине с древнейших времен до начала XX века / В.В. Кислов, С.Н. Кузьменко. – Киев, 1992. – 56 с. (Предпр. / АН Украины. ИСМ им. В.Н. Бакуля).
2. Основоположник науки о резании металлов профессор К.А.Зворыкин /М.Ф.Семко //Науч. зап. Харьк. механико-машиностроит. ин-та. – Харьков: [б.и.], [конец 1949 – начало 1950] (Тип. «Коммунист» Укрполиграфиздата). – Т. 9, вып. 2. – С. 3-8. – На обл.: 1950.
3. Теория и практика силового резания металлов /М.Ф.Семко //Силовое резание металлов: сборник. Харьков: Харьк. кн.-газ. изд-во, 1953. – С. 3-35.
4. В нашем политехническом /М.Ф.Семко //Красное знамя. – 1963.

ФІЗИКА ТА МЕХАНІКА ПРОЦЕСІВ ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ

УДК 621.923

А. И. ГРАБЧЕНКО, д-р техн. наук, **И. Н. ПЫЖОВ**, д-р техн. наук,
В. А. ФЕДОРОВИЧ, д-р техн. наук, Харьков, Украина

К МЕТОДОЛОГИИ РЕАЛИЗАЦИИ ПОТЕНЦИАЛА РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ЛЕЗВИЙНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ ИЗ ПСТМ

Викладена методологія вирішення проблеми формоутворення лезових інструментів з ПНТМ заснована на використанні принципу вибіркової переважної доцільної послідовності реалізації потенціалу процесів електроерозійної обробки і алмазного шліфування з додатковою електрохімічною або електроіскровою дією на зв'язку струмопровідних кругів на основі мікропорошків алмазу. З позиції інжинірингу якості доведена конкурентоспроможність запропонованого підходу.

Изложена методология решения проблемы формообразования лезвийных инструментов из ПСТМ основанная на использовании принципа выборочной предпочтительной целесообразной последовательности реализации потенциала процессов электроэрозионной обработки и алмазного шлифования с дополнительным электрохимическим или электроискровым воздействием на связку токопроводящих кругов на основе микропорошков алмаза. С позиции инжиниринга качества доказана конкурентоспособность предложенного подхода.

The concept of sample preferred purposeful realization of an electroerosion processing potcutical and diamond grinding with an additional intensive electrochemical or local electrosark action to the bond of a wheel is introduced for achievement of high side of quality and dimensional accuracy of edge tools from superhard polycrystals under application of conducting wheels on the base of the diamond classified flours with relief thick metal coatings. The practical implementation of this concept is carried out owing to a number of the technical decisions enclosed by more than twenty author's certificates.

1. Постановка проблемы. Известно, что лезвийный инструмент из поликристаллических сверхтвердых материалов (ПСТМ) уже нашел широкое применение в различных отраслях промышленности. Особый интерес при этом представляет прецизионный (в том числе и сложнопрофильный) алмазный инструмент, используемый на чистовых и финишных операциях к которому предъявляются повышенные требования по точности и качеству.

На рис. 1 приведен эскиз достаточно точного алмазного резца, применяемого в радиоэлектронной промышленности. С его помощью

ведется чистовая обработка канавок на изделиях из латуни на автоматической линии по технологии фирмы RADIALL (Франция).

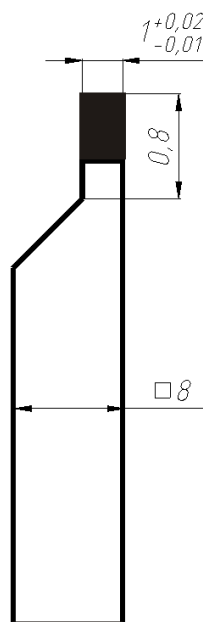


Рисунок 1 – Прецизионный алмазный канавочный резец

Сложность изготовления таких инструментов заключается с одной стороны в их невысокой жесткости, а с другой - в малой площади контакта алмаза с поверхностью державки (площадь пайки). В результате этого при изготовлении таких инструментов обычными методами могут возникать значительные сколы на режущих кромках, а также произойти нарушение контакта алмазного поликристалла с державкой под воздействием значительных усилий резания и температур.

При обработке «всухую» возможно также расплавление низкотемпературного припоя (например, на основе серебра). Кроме этого, существенные трудности изготовления связаны с высокой размерной точностью (в данном случае допуск на обработку $T=0,03\text{мм}$). Здесь следует понимать, что данные значения допуска можно считать достаточно «жесткими» даже при изготовлении инструментов из обычных инструментальных материалов. При обработке же алмаза практически нет соответствия между подачей по лимбу и величиной реального съема припуска в силу наличия явления скачкообразности самозатачивания круга. При этом съем припуска в момент самозатачивания алмазного круга может достигать 0,1мм и более. Результатом этого является значительный процент брака при изготовлении лезвийных инструментов по причине выхода их размеров за пределы установленного поля допуска. Это требует изменения технологии производства прецизионного алмазного инструмента. В ее основу должны быть положены методы, которые с одной стороны не создают критических значений сил и температуры в зоне шлифования, а с другой способствуют устойчивости процесса обработки.

2. *Анализ последних исследований и публикаций.* Поскольку почти все известные сверхтвердые материалы на основе алмаза являются проводниками электрического тока, то для их рационального

использования с одной стороны и уменьшения величины припуска на чистовой стадии формообразования с другой целесообразно применение электроэрозионной обработки (ЭЭО) на проволочных вырезных станках с ЧПУ [1]. Режимные факторы при этом должны обеспечивать необходимое состояние режущих кромок (величина сколов кромки $v \leq 0,02\text{мм}$). При этом передняя поверхность инструментов затачивается токопроводящим алмазным кругом на основе микропорошков алмаза с рельефными толстослойными покрытиями [2, 3, 4, 5, 6], а задние поверхности в две стадии. Вначале их формируют на проволочно-вырезном электроэрозионном станке под углами на $(1-2)^\circ$ большими, нежели их чертежные значения. Затем, также как и в случае обработки передней поверхности, производят чистовую заточку токопроводящим алмазным кругом на основе микропорошков алмаза с рельефными толстослойными покрытиями. Такой подход можно считать системным т.к. он основан на использовании потенциала различных процессов обработки.

Это позволяет довести размерную точность инструментов до значения 5мкм при шероховатости обработанной поверхности $Ra=0,02 - 0,04\text{мкм}$.

3. Цель исследования. Целью настоящей работы является установление некоторых особенностей, связанных с системным подходом к процессу формообразования лезвийных инструментов из ПСТМ и оценка его эффективности в целом на базе использования идеи инжиниринга качества.

4. Основные материалы исследования.

В работе [6] изложены основы методологии решения проблемы формообразования лезвийных инструментов из ПСТМ основанной на использовании принципа выборочной предпочтительной целесообразной последовательности реализации потенциала процессов электроэрозионной обработки и алмазного шлифования с дополнительным электрохимическим или электроискровым воздействием на связку токопроводящих кругов на основе микропорошков алмаза. Рассмотрим некоторые особенности, связанные с использованием различных процессов обработки на базе которых основана указанная выше методология.

Особенности формирования качества режущих кромок при электроэрозионной обработке токопроводящих ПСТМ. С учетом того, что большинство ПСТМ на основе алмаза, используемых для изготовления лезвийных инструментов, являются проводниками электрического тока благодаря наличию в их составе металлических включений (металлической фазы), была выдвинута идея о возможности сведения к

минимуму применение черного алмазного шлифования путем использования электроэрозионной обработки (ЭЭО) для уменьшения сколов на их режущих кромках. Важность такого подхода приобретает особое значение в случае использования заготовок ПСТМ больших размеров (когда требуется их предварительный раскрой), а также при необходимости получения сложного профиля.

Основное отличие механизма удаления припуска при обработке гетерогенных, какими являются ПСТМ, от однородных материалов связано с присутствием алмазных зерен, являющихся диэлектриками, между которыми, как правило, находится некоторое количество металлической связки, наличие которой и делает эти ПСТМ электропроводными.

Схема удаления ПСТМ непрофилированным (проволочным) электродом-инструментом (ЭИ) представлена на рис. 2.

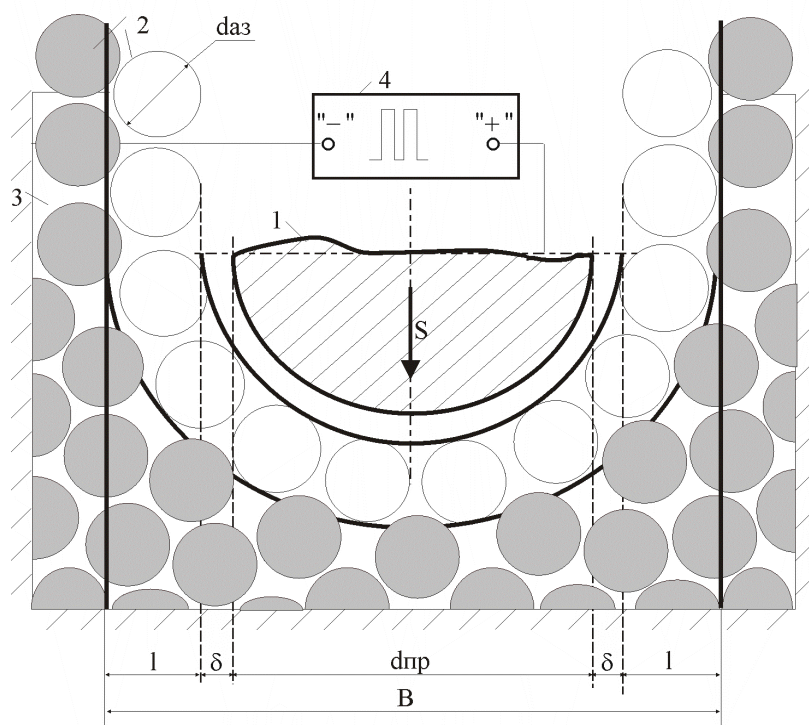


Рисунок 2 – Схема удаления припуска с ПСТМ непрофилированным ЭИ:

1 - проволочный ЭИ; 2 - алмазные зерна; 3 - токопроводящая связка;

4 - генератор униполярных электрических импульсов.

Установлено, что в силу наличия так называемого «краевого» эффекта режущие кромки представляют собой наиболее уязвимую часть рабочей поверхности лезвийных инструментов из ПСТМ. Как и при обработке других рабочих поверхностей инструментов, качество кромок является функцией многих параметров. Однако их влияние в данном случае проявляется более интенсивно. Можно предположить, что условия,

способствующие увеличению производительности ЭЭО, будут одновременно обеспечивать снижение качества режущих кромок. В качестве основных критериев, характеризующих качество режущих кромок на этапе обработки непрофилированным электродом-инструментом (проволокой), можно принять величину кратеров ν (по аналогии со сколом при шлифовании) от электроэрозионных разрядов и отклонение кромки от прямолинейности (Δ). При этом должно быть выдержано условие $\nu(\Delta) \leq 0,02$ мм.

Производительность ЭЭО ПСТМ во многом обусловлена составом и свойствами компонентов, составляющих структуру самого поликристалла. Основными из них считаются процентное содержание металлической связки в их составе и размер зерен исходного микропорошка сверхтвердого материала [8]. В развитие данных, полученных в работе [8], было высказано предположение об особой роли процентного содержания металлической связки в составе ПСТМ с одной стороны, а с другой предложено использовать для анализа обрабатываемости ПСТМ электрической эрозией такой показатель, как электроэрозионная стойкость материала [1], оцениваемую, например, по критерию Палатника Л.С. Этот критерий учитывает одновременное влияние комплекса физических свойств обрабатываемого материала на его способность противостоять электроэрозионному разрушению.

Согласно формуле Палатника Л.С. электроэрозионная стойкость обрабатываемого материала может быть определена следующим образом:

$$\mathcal{E}_{cm.} = C \cdot \rho \cdot \lambda \cdot T^2 \cdot K, \quad (1)$$

где $\mathcal{E}_{cm.}$ - электроэрозионная стойкость; C - удельная теплоемкость, $\text{кДж}/\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}$; ρ_n - плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$; λ - коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; $T_{пл}$ - температура плавления, $^\circ\text{C}$; K - постоянный коэффициент, $10^{-8} \cdot \text{К} \cdot \text{м}^4 / (\text{кДж} \cdot \text{Вт})$.

В таблице 1 приведены расчетные значения $\mathcal{E}_{cm.}$ для материалов, которые могут входить в состав алмазных поликристаллов.

Таблица 1 – Электроэрозионная стойкость обрабатываемых материалов

Обрабатываемый материал	Алмаз	Хром	Никель	Кобальт
$\mathcal{E}_{cm.}$	157	4,2	5,1	4,1

При обработке ПСТМ как гетерогенных материалов это предопределяет опережающее электроэрозионное разрушение связки и, таким образом, способствует реализации механизма удаления обрабатываемого материала, согласно которому зерна сверхтвердого материала, а, скорее всего их части, не успевшие подвергнуться расплавлению или испарению, выпадают в результате электроэрозионного удаления или оплавления связки вокруг них.

Исследования показали, что при небольшом объеме металлической связки с увеличением размеров исходных зерен сверхтвердого материала производительность процесса однозначно снижается (рис. 3, кривая 1).

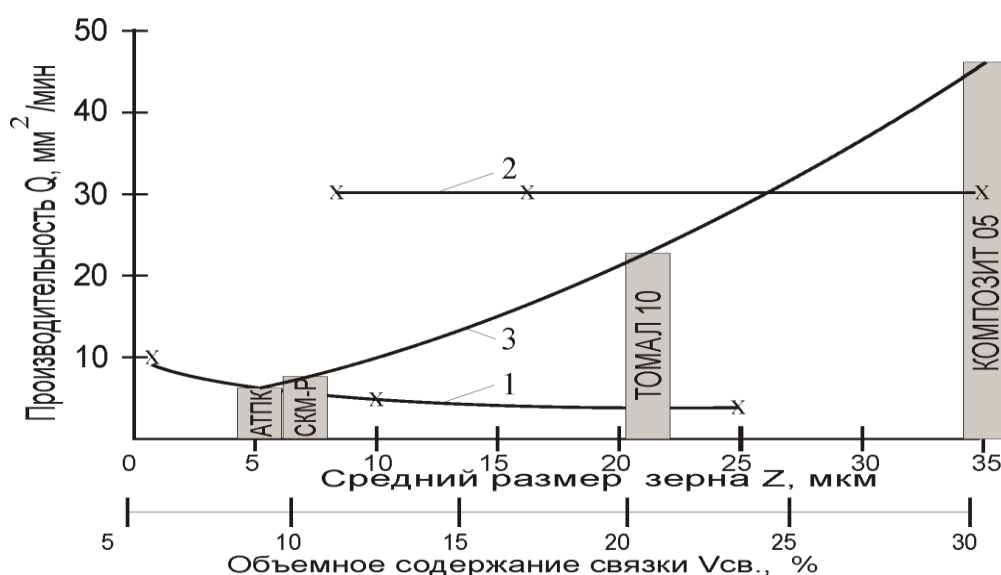


Рисунок 3 – Влияние различных факторов на производительность ЭЭО:

- 1 - $Q = f(Z)$, обрабатываемый материал - синтетический алмаз ($V_{св.} \approx 4-13\%$);
- 2 - $Q = f(Z)$, обрабатываемый материал - алмазоносный слой ($V_{св.} \approx 75\%$);
- 3 - влияние обрабатываемый материал (расположение по росту $V_{св.}$).

Однако при преобладающих объемах связки (например, в алмазоносном слое круга на основе микропорошков алмаза имеющем в своем составе 75% связки М2-01) картина резко меняется (рис. 3, кривая 2).

Использование в качестве обрабатываемых образцов алмазоносного слоя круга на металлической связке М2-01 с микропорошками АСН 100% зернистостью $Z=10/7-40/28$ давало возможность обеспечения чистоты эксперимента в плане установления влияния размера зерен на выходные показатели ЭЭО при большом содержании связки. Исследования показали, что увеличение зернистости порошка в указанных пределах при диаметре проволоки 0,25мм практически не сказывается на производительности

обработки. Это связано, по всей видимости, с меньшей эрозионной стойкостью алмазосодержащего слоя круга в целом (из-за малой доли алмазных зерен) с одной стороны, а с другой преимущественным проявлением в таких условиях механизма съема ПСТМ, согласно которому зерна ПСТМ выпадают в результате электроэрозионного удаления окружающей их связки. Эти результаты согласуются с данными зарубежных исследователей. Так, согласно работам [9], [10] производительность ЭЭО синтетического алмаза Syndite СТВ010 (размер исходного микропорошка $\approx 10 \text{ мкм}$) и СТВ025 (размер исходного микропорошка $\approx 25 \text{ мкм}$) практически не отличается ($Q = 3,5 - 5,7 \text{ мм}^2 / \text{мин}$ и $Q = 4,0 - 4,2 \text{ мм}^2 / \text{мин}$) уже при содержании кобальта в их составе примерно 8%.

Для подтверждения особой роли металлической связки были проведены эксперименты по ее влиянию на ширину прорезаемого паза изделия.

Согласно рисунку 2 с использованием [7] имеем, что ширина реза может быть определена по выражению:

$$B = d_{\text{пр.}} + 2 \cdot \delta + 2 \cdot l, \quad (2)$$

где B - ширина прорезаемого паза; $d_{\text{пр.}}$ - диаметр электрода-проволоки; δ - величина межэлектродного промежутка; l - глубина лунок от электроэрозионных разрядов.

Известно, что зазор на сторону зависит от величины напряжения на электродах. Эта зависимость линейна и для случая прорезки пазов может быть представлена формулой [11]:

$$a = K_{\text{РЖ}} \cdot U_o, \quad (3)$$

где a - величина зазора на сторону, мм; $K_{\text{РЖ}}$ - коэффициент, зависящий от вида рабочей жидкости (например, для керосина $K_{\text{РЖ}} = 0,125$ [11]); U_o - напряжение на электродах, В.

С другой стороны согласно зависимости (2) можно записать, что:

$$a = \delta + l = \frac{B - d}{2} \quad (4)$$

Из зависимостей (3) и (4) имеем, что ширина прорезаемого паза должна равняться:

$$B = d + 2 \cdot K_{\text{РЖ}} \cdot U_o \quad (5)$$

Это значит, что согласно выражениям (3) – (5) значения параметров B и a не должны зависеть от обрабатываемого материала.

Экспериментально установлено, что при обработке ПСТМ на основе алмаза (например, марок СКМ-Р и АТП), имеющих примерно одинаковое объемное содержание связки ($V_{св} \approx 8,5-10\%$), это положение выдерживается ($B \approx 0,33\text{мм}$, $a \approx 0,04\text{мм}$). Однако при обработке ПСТМ на основе кубического нитрида бора (КНБ) марки К-05, имеющего в своем составе гораздо больше связки ($V_{св} \approx 30\%$), ширина паза примерно на 20% больше. В то же время при сопоставимых условиях обработки ПСТМ и, например, алмазоносного слоя круга зернистостью 10/7 ($V_{св} \approx 75\%$), ширины прорезаемых пазов после ЭЭО проволочным ЭИ отличаются еще более существенно ($B \approx 0,45\text{мм}$, $a \approx 0,1\text{мм}$).

Таким образом, полученные результаты подтверждают положение о ключевой роли при электроэрозионной обработке таких показателей, как процентное содержание металлической связки в составе ПСТМ и соотношения значений электроэрозионной стойкости материалов входящих в поликристалл.

В отличие от зернистости порошка исходного материала влияние содержания связки можно проследить даже для различных обрабатываемых материалов (рис. 3, кривая 3). При этом можно утверждать, что с точки зрения производительности процесса увеличение $V_{св.}$ является положительным, а по отношению к качеству обработанной поверхности (и особенно режущих кромок) отрицательным моментом (рис. 3), что соответствует классическим представлениям. Нам представляется, что не столько различием теплопроводности [8], сколько повышенным содержанием металлической связки можно объяснить тот факт, что качество обработки электрической эрозией ПСТМ на основе КНБ хуже, чем у поликристаллов алмаза.

Эти данные согласуются с результатами исследований по влиянию электропроводности ПСТМ на выходные показатели ЭЭО, выполненных в Бирмингемском университете (Англия [12]). Установлено, что в определенном диапазоне значений процентное содержание связки в ПСТМ определяет уровень его электрической проводимости. Эти эксперименты показали, что при одинаковых режимах обработки (сила тока, напряжение, частота импульсов и т. д.) производительность ЭЭО синтетического алмаза Syndite СТВ010 (метод получения – спекание) выше по сравнению с алмазом Cvdite CDE (CVD метод) примерно на 50% при использовании проволочного электрода-инструмента и примерно на 85% при ротационной обработке дисковым ЭИ. Причиной этого авторы считают различия в значениях удельного электрического сопротивления этих материалов

($\rho_{yd.} \approx 58000$ мкОм см у Cvdite CDE и $\rho_{yd.} \approx 12000$ мкОм см у Syndite CTB010). В то же время качество поверхности лучше у Cvdite CDE ($R_a \approx 0,15$ мкм) по сравнению с Syndite CTB010 ($R_a \approx 0,20$ мкм). Этот факт можно считать еще одним подтверждением той роли, которую играют такие параметры как объемное содержание связки и соотношение электроэрозионной стойкости ($\mathcal{E}_{ст.}$) зерен исходного материала и металлической фазы.

Типичные картины состояния кромок ПСТМ после ЭЭО представлены на рис. 4.

В общем случае при неизменных электрических режимах качество кромок улучшается по мере уменьшения процентного содержания связки в ПСТМ (в пределах достаточных для нормального протекания ЭЭО) и размеров зерен исходного материала, а также увеличения диаметра проволочного ЭИ и угла заострения режущей кромки. Важна роль распределение связки в ПСТМ, неравномерность которой приводит как к возникновению отклонения режущей кромки от прямолинейности, что особенно характерно для ПСТМ с большим содержанием металлической связки (например, у ПСТМ марки К-05), так и появлению достаточно крупных кратеров (напоминающих сколы после шлифования) и являющихся результатом удаления блока алмазных зерен охваченных металлической связкой (рис. 4 в).

Чрезмерно большое содержание металлической связки (например, в алмазоносном слое круга АСМ 20/14 100% М2-01) ведет к резкому снижению качества кромки (рис. 4 г).

Что касается рабочей жидкости, то достаточно хорошие результаты в плане обеспечения качества кромок ПСТМ были получены при использовании промышленной воды. Несмотря на то, что, например, керосин и вода по вязкости и плотности различаются мало, относительная диэлектрическая проницаемость последней почти в 40 раз больше, чем у керосина. Это же можно сказать и про их удельные электропроводности которые для промышленной воды и керосина соответственно равны $2.8 \cdot 10^{-1}$ и 10^{-15} Ом·м⁻¹.

Поэтому при ЭЭО в воде возрастают потери энергии в канале разряда [13] и, как следствие этого, при одинаковой величине энергии импульсов уменьшаются размеры лунок при одновременном росте межэлектродного промежутка. С другой стороны, при разряде в воде в отличие от электрического разряда в жидких углеводах практически отсутствует

обратная полуволна тока и минимально возможное значение токоограничивающего сопротивления в зарядной цепи может быть меньше. Следовательно, при ЭЭО в воде реализуемая мощность генератора электрических импульсов больше, чем для керосина.

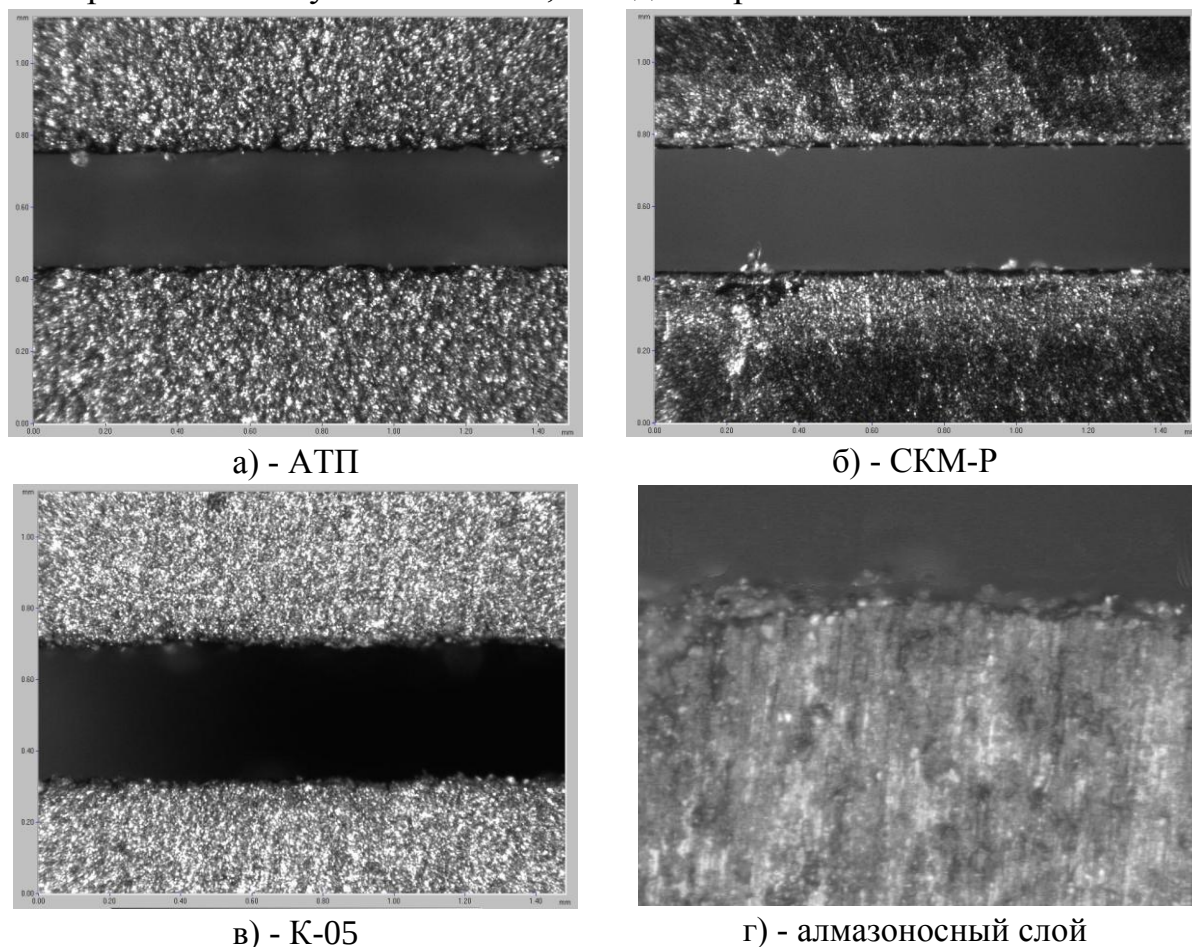


Рисунок 4 – Состояние кромок ПСТМ после ЭЭО
непрофилированным ЭИ ($\beta = 90^\circ$)

В воде отсутствуют твердые продукты разложения, свойственные ЭЭО в жидких углеводах, а также ускоряется выведение продуктов путем струйной подачи воды в зону. Этим можно объяснить стабильность процесса при обработке большинства материалов, и, в конечном счете, более высокую производительность ЭЭО в воде.

Кроме этого вода является более приемлемой рабочей жидкостью с точки зрения пожарной безопасности и меньшей стоимости.

Как известно [7], [13] параметрами режима ЭЭО являются напряжение, сила тока (определяющие энергию импульсов), а также частота следования электрических импульсов, от значения которых зависит производительность и качество процесса. Поэтому они должны

быть оптимизированы с точки зрения получения требуемого качества режущих кромок.

Известно, что их влияние на величину объема материала, удаляемого в единицу времени, имеет вид [13]:

$$Q = f(k, f_d, W_u),$$

где Q - объем материала удаляемого в единицу времени; k - опытная постоянная величина (зависящая главным образом от теплофизических свойств обрабатываемого материала, рабочей жидкости, условий удаления продуктов электрической эрозии из МЭП и т.д.); f_d - действительная частота электрических разрядов; W_u - энергия единичного электрического импульса.

Установлено, что из режимных факторов наибольшее влияние на качество рабочих элементов лезвийных инструментов из ПСТМ оказывает энергия единичных импульсов. С ее увеличением разность значений $\mathcal{E}_{ст.}$ зерен исходного сверхтвердого материала и связки проявляется еще в большей степени, что ведет к ухудшению качества режущих кромок.

Как известно [13] энергия единичного импульса является функцией емкости и пробивного напряжения и определяется по зависимости:

$$W = \frac{C \cdot U_{пп}^2}{2} \approx \frac{0,72 \cdot C \cdot U_{ип}^2}{2},$$

где W - энергия единичного электрического импульса, Дж; C - емкость конденсатора, Ф; $U_{пп} \approx 0,72 \cdot U_{ип}$ - пробивное напряжение, В; $U_{ип}$ - напряжение источника питания, В.

Исследование влияния единичных электрических импульсов на электроэрозионное удаление ПСТМ на основе алмаза позволили получить зависимость, связывающую объем лунки от разряда ($V_l, 10^{-4} \text{ мм}^3$) с емкостью конденсатора (C) и величиной межэлектродного промежутка (δ), которые определяют энергию единичного импульса [$X1=-1, 0, +1$ ($C=100, 250, 400\text{мФ}$); $X2=-1, 0, +1$ ($\delta=2, 7, 12\text{мкм}$) $U=100\text{В}$]:

$$V_l = (1,58 + 0,20 \cdot X1 - 0,66 \cdot X2 - 0,08 \cdot X1 \cdot X2 - 0,05 \cdot X1^2 + 0,35 \cdot X2^2).$$

Достоинством поликристаллов алмаза по сравнению с КНБ следует считать тот факт, что, как известно алмаз не стабилен в окисляющейся атмосфере при температуре больше чем 700°C и в процессе высокого теплового воздействия, каким сопровождаются электроискровые разряды, может превращаться в графит. Образование графитизированного

поверхностного слоя, являющегося хорошим проводником электрического тока, имеет ряд положительных моментов. Во-первых, облегчает дальнейшее протекание электрической эрозии алмаза; во-вторых, рассеивает энергию импульса по большей длине кромки и, в-третьих, снижает пороговое значение импульсов тока [8]. Этот факт является еще одной существенной причиной лучшего качества кромок инструментов на основе алмаза после ЭЭО по сравнению с КНБ. Снижение порогового значения импульсов тока в свою очередь позволяет в случае необходимости делать чистовые проходы при более щадящих электрических режимах, что также благоприятно отражается на качестве кромок. Исследованиями установлено, что в рабочем диапазоне величин энергии 2 - 13,5 мДж значения параметров режущих кромок (R_z и ρ_k) алмазных инструментов находятся в пределах 10-50 мкм, а величина кратеров от электроэрозионных разрядов на кромках в диапазоне 10-100 мкм. В связи с этим определены оптимальные режимы ЭЭО проволочным ЭИ применительно к различным маркам ПСТМ с точки зрения требований к минимизации затрат на этапе чистового алмазного шлифования (см. табл. 2.).

Таблица 2 – Рекомендуемые режимы ЭЭО ПСТМ*

Обрабатываемый ПСТМ	Энергия импульсов W , мДж	Частота импульсов f , кГц
СКМ-Р, АТПМ	4-6	8
К-05	9-11	6
Томал	11-13,5	4

*скважность электрических импульсов равна 2.

Таким образом, можно считать, что ЭЭО проволочным ЭИ является достаточно серьезной альтернативой черновой обработке ПСТМ алмазным шлифованием кругами на основе шлифпорошков алмаза как с точки зрения экономии поликристаллов, так и получения требуемого качества режущих кромок для последующей чистовой обработки.

Особенности процесса управления режущим рельефом и макропрофилем токопроводящих кругов на основе микропорошков алмаза с покрытиями. Они обусловлены в первую очередь возможностью реализации малых величин межэлектродных зазоров с одной стороны и электропроводностью самих покрытий с другой.

Известно, что наличие металлического покрытия на зерне является фактором, препятствующим его преждевременному выпадению из связки круга. Однако еще одним существенным моментом является то, что путем

изменения вылета зерна относительно самого покрытия можно целенаправленно влиять на характер его разрушения. Это можно считать дополнительным резервом в плане повышения режущего ресурса алмазных зерен. Также как и токопроводящая связка круга, металлическое покрытие может удаляться с дозированной скоростью за счет ввода в зону управления электрической энергии. Возможны три характерных варианта состояния элементов подсистемы «связка круга – металлическое покрытие – алмазное зерно» при электрофизикохимическом управлении режущим рельефом токопроводящих кругов с металлизированными алмазными зернами. Они связаны с соотношением скоростей принудительного удаления материалов связки круга $V_{св.}$ и покрытия $V_{покр.}$. В первом случае оба материала удаляются с одинаковой скоростью ($V_{покр.} \sim V_{св.}$), в двух остальных идет опережающее удаление одного из компонентов ($V_{покр.} < V_{св.}$ или $V_{покр.} > V_{св.}$).

В случае электрохимического воздействия на связку круга согласно первому закону Фарадея количество металла, удаляемого с поверхности анода (круга), можно определить по зависимости [13, 14]:

$$Q_M = K_{\mathcal{E}} \cdot I \cdot t \cdot \eta, \quad (6)$$

где Q_M - количество металла, удаляемого с поверхности анода, Г; $K_{\mathcal{E}}$ - массовый электрохимический эквивалент, Г/А·мин); I - сила тока, А; t - длительность прохождения тока, мин.; η - коэффициент выхода по току.

На схеме (рис. 5) представлены два характерных состояния подсистемы «связка круга – покрытие - алмазное зерно».

Известно [14], что при размерной электрохимической обработке при постоянной температуре сопротивление электролита определяется зависимостью:

$$R_{\mathcal{E}} = \rho_{уд.} \cdot \frac{\Delta}{F}, \quad (7)$$

где $R_{\mathcal{E}}$ – электрическое сопротивление электролита, Ом; $\rho_{уд.}$ - удельное сопротивление электролита Ом·см; Δ - длина столба электролита между электродами, см; F - площадь поперечного сечения столба электролита см².

При включении электрического напряжения реализуется электрическая схема с двумя параллельно включенными сопротивлениями, причем согласно выражению (7) величина последнего в цепи «катод – покрытие» будет несколько меньше, чем в цепи «катод – связка круга» что объясняется неравенством межэлектродных зазоров ($\Delta_{покр.1} < \Delta_{св.1}$, рис. 5 а).

Если предположить, что значения K_3 и ρ материалов связки и покрытия равны друг другу ($V_{\text{покр.}}=V_{\text{св.}}$), то это однозначно обусловит большую плотность тока в первой цепи, а, следовательно, и большую интенсивность электрохимического растворения покрытия. С течением времени величина межэлектродного зазора $\Delta_{\text{покр.1}}$ будет увеличиваться быстрее, нежели $\Delta_{\text{св.1}}$, а, следовательно, покрытие удалится на большую величину ($\Delta_{\text{св.2}} - \Delta_{\text{покр.2}} > \delta_{\text{св.}}$), чем связка (рис. 5 б).

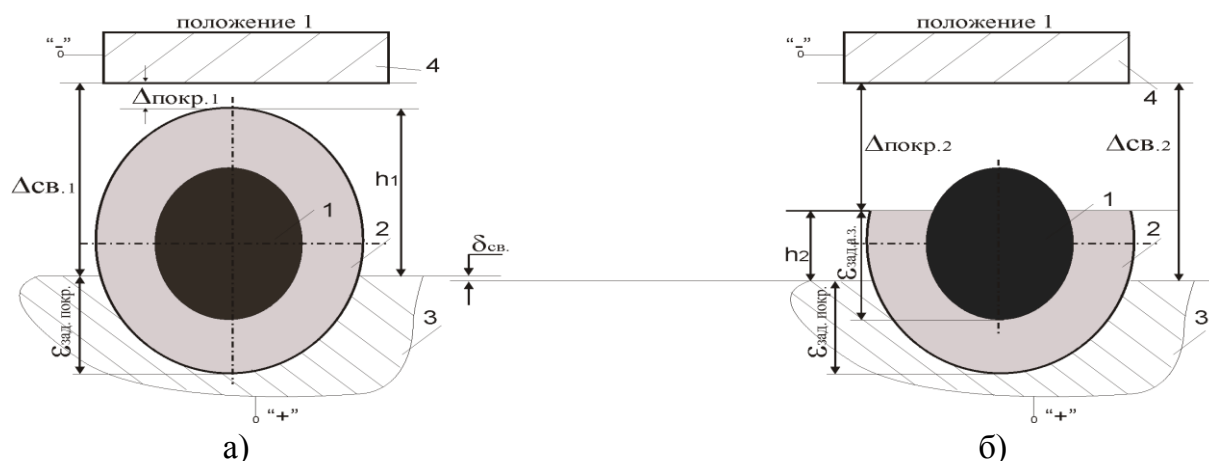


Рисунок 5 – Характерные состояния подсистемы «связка круга – покрытие – алмазное зерно»: 1 – алмазное зерно; 2 – металлическое покрытие; 3 – связка круга; 4 – автономный правящий катод.

Отмеченные выше возможные три характерные схемы взаимного расположения элементов подсистемы «связка круга – металлическое покрытие – алмазное зерно», зависящие от значения электрохимических эквивалентов и коэффициентов выхода по току пары «связка круга – металлическое покрытие», представлены на рис. 6.

Для рассмотренного выше случая, когда $V_{\text{покр.}}=V_{\text{св.}}$, уровни связки круга и покрытия со временем выровняются и будут пребывать в таком состоянии до полного износа круга (рис. 6 б).

Как установлено в работе [15], определяющим фактором, ответственным за характер износа алмазных зерен, является высота их выступания над уровнем связки круга. Находясь в промежуточной среде (покрытии), зерно может иметь гораздо большую (до двух раз) высоту выступания над связкой. Исходя из этого факта, первая (рис. 6 а) и последняя (рис. 6 в) схемы взаимного расположения элементов подсистемы будут способствовать вероятнее всего преимущественному проявлению механизмов микро- и макроразрушения зерен соответственно.

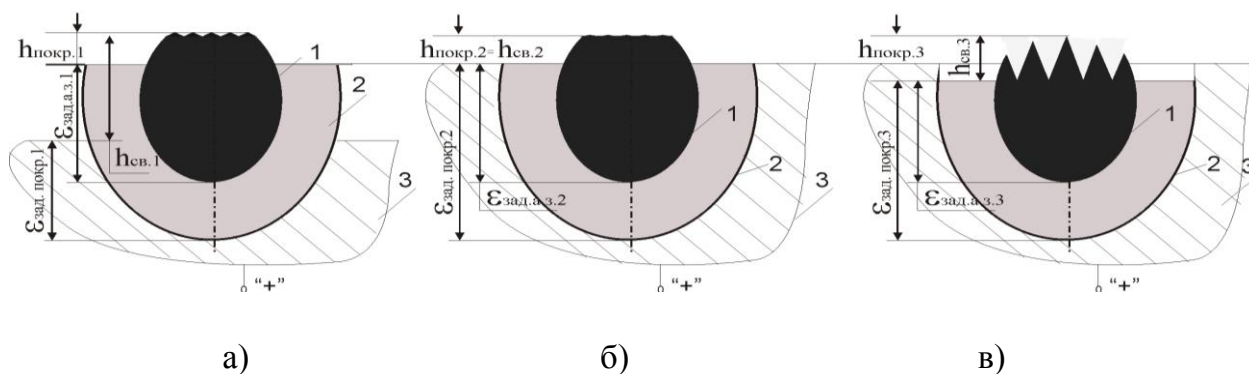


Рисунок 6 – Схемы взаимного расположения элементов подсистемы «связка круга – покрытие - алмазное зерно»: 1 – алмазное зерно; 2 – металлическое покрытие; 3 – связка круга.

Таким образом, управляя процессом разрушения (самозатачивания) зерен микропорошка путем изменения соотношения скоростей удаления связки круга и покрытия, можно в определенной-то степени влиять на значения выходных показателей обработки. На практике это достигается, например, путем определенного сочетания свойств пары «металлическое покрытие – связка круга».

Установлено, что совместно с другими эффектами это даст возможность в целом приблизить удельный расход алмазов круга на основе микропорошков алмаза к уровню, который характерен для кругов на основе алмазных шлифовальных порошков.

Для примера проанализируем, например, ситуацию применительно к наиболее распространенной металлической связке М2-01 (имеющей в своем составе 80% Cu и 20% Sn) в случае использования покрытия на основе Ni. Расчеты показывают, что электрохимический эквивалент этой связки составляет $\approx 0,363$ мГ/Кл, а двухвалентного никеля $\approx 0,304$ мГ/Кл. Близкие значения имеют и коэффициенты выхода по току [14] (соответственно $\eta_{Cu} \approx 98\%$, $\eta_{Ni} \approx 96\%$). Эти данные свидетельствуют о том, что скорость удаления покрытия несколько меньше интенсивности растворения связки. В результате этого само покрытие выступает на некоторую величину над уровнем связки (принятым за «нулевое» положение), а зерно в нем будет иметь максимальную заделку ($h_{зад.з.1} \rightarrow \max$), что позволит создать условия для наиболее рациональной схемы закрепления зерна в покрытии, а покрытия в связке (рис. 6 а). На практике в таких благоприятных с точки зрения закрепления зерна условиях, по всей видимости, будет реализован механизм микроразрушения зерен, что должно способствовать максимально возможному использованию их потенциальных режущих свойств.

В случае использования связки на основе алюминия (электрохимический эквивалент которого $\approx 0,093$ мГ/Кл) картина обратная. В этом случае происходит опережающее растворение материала покрытия, что создает условия для реализации механизма макроразрушения зерна.

Такой вариант менее предпочтителен, нежели тот, при котором связка растворяется несколько более интенсивно, чем покрытие, т.к. в случае даже достаточной величины заделки покрытия в связке само зерно, находясь в нем, может существенно оголиться и преждевременно выпасть.

Экспериментальные данные показали, что удельный расход кругов на связке М1-01 (на основе алюминия) в 1,3 – 1,4 выше, чем у связки М2-01, что в определенной степени может являться подтверждением изложенных выше рассуждений.

Таким образом, свойства материалов покрытия и связки круга представляют определенный интерес с точки зрения управления механизмом разрушения зерен микропорошка алмаза, а, следовательно, и выходными показателями процесса шлифования ПСТМ кругами на их основе. В случае реализации электрохимического управления определяющими являются такие факторы, как коэффициент выхода по току и электрохимический эквивалент материалов связки и покрытия.

В тех случаях, когда к лезвийным инструментам из ПСТМ предъявляются повышенные требования (сюда в первую очередь следует отнести прецизионные инструменты и инструменты со сложным профилем) к состоянию рабочей поверхности кругов должны предъявляться повышенные требования.

Они состоят в том, что с одной стороны существует необходимость обеспечить равенство скоростей удаления связки и износа зерен круга, а с другой - поддержания необходимого профиля РПК. Сюда же непосредственно примыкает вопрос устранения первоначального торцового или радиального биения круга, значение которого объясняется, в том числе и повышенной жесткостью кругов на металлических связках.

Одной из важных особенностей при использовании токопроводящих кругов на основе микропорошков алмаза является то, что высота их рельефа настолько мала, что становится сопоставимой с биением круга. Как показано в работе [16], радиальные колебания периферийного круга оказывают существенное влияние на шероховатость поверхности даже при обработке пластичных материалов, что требует особого отношения к предварительной правке круга. Это подтверждает необходимость особого подхода к процессам управления РПК в плане создания научных

предпосылок для обеспечения технологической устойчивости в процессе формообразования лезвийных инструментов из ПСТМ (без чего стабилизации силовой и тепловой напряженности процесса шлифования на допустимом уровне практически невозможна). В связи с этим было выдвинуто следующее положение применительно к чистовой обработке (когда с ПСТМ снимаются незначительные припуски): благодаря малым величинам межэлектродных зазоров не только становится целесообразным использование электроискрового управления, но и значительно расширяются технологические возможности этого процесса. На практике это проявляется в возможности обеспечения электрических импульсов с достаточно большими либо предельно малыми значениями энергии (в зависимости от характера стоящих задач).

Отмеченные преимущества можно использовать комплексно, что позволяет обеспечивать точность и качество обработки при максимальной эффективности процесса шлифования. Так, например, комбинируя процессы интенсивного электрохимического и локального электроискрового управления, можно основную часть погрешностей профиля РПК удалять с помощью высокопроизводительного электрохимического, а окончательное его формообразование путем избирательного электроискрового воздействий на РПК токопроводящего круга. Этот подход обусловлен тем, что в случае существенного различия в значениях электрохимических эквивалентов компонентов связки, а также некоторых других факторов электрохимическое воздействие не позволяет обеспечивать достаточно ровную поверхность последней (экспериментально установлено, что для существующих связок круга $\delta \leq 0,015-0,02\text{ мм}$). А это весьма нежелательно при использовании мелкозернистых кругов. Эффективность такого подхода подтверждается экспериментально (рис. 7).

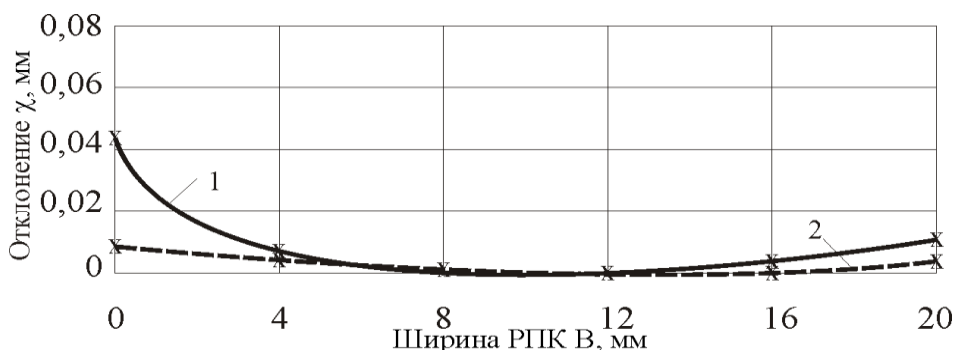


Рисунок 7 – Влияние способа управления на отклонение (χ) поперечного профиля рабочей поверхности торцового круга: 1 - электрохимический способ; 2 - электроискровой способ.

Обоснование конкурентоспособности предложенного подхода с позиции инжиниринга качества. Известно, что традиционные показатели качества шлифованных изделий не всегда однозначно влияют на предполагаемую работоспособность изделий. Поэтому считается, что оценка работоспособности по другим (косвенным) критериям требует весьма взвешенного подхода. Здесь может быть весьма полезна концепция инжиниринга качества, предложенная Г. Тагути [17]. Главное в философии Тагути - это повышение качества с одновременным снижением расходов. При этом экономический фактор (стоимость) и качество анализируются совместно и таким образом связываются общей характеристикой, называемой функцией потерь. При анализе важно рассматривать потери, как со стороны потребителя, так и со стороны производителя.

Существует множество подходов, реализующих идею инжиниринга качества. Основной же его идеей следует считать необходимость постоянного совершенствования процессов и как следствие качества продукции. Согласно методу Тагути качество не должно рассматриваться как мера соответствия требованиям стандартов, т.к. зачастую не просто требуется факт нахождения показателя в пределах допуска, а учет фактора неравноценности значений показателя внутри допуска.

Основываясь на идее инжиниринга качества, выполним анализ существующих (способы 1 и 2) и предложенного (способ 3 - ЭЭО непрофилированным электродом-инструментом с последующей доводкой токопроводящим кругом на основе микропорошков алмаза) процессов формообразования лезвийных инструментов из ПСТМ на примере изготовления режущей части резца (см. рис. 1). В качестве существующих приняты следующие процессы: доводка кругом на основе микропорошков алмаза на органической связке В2-01 (способ 1) и электроэрозионная обработка профилированным (дисковым) графитовым электродом – инструментом [8] (способ 2). Для этого рассмотрим важнейшие составляющие суммарной технологической себестоимости. Последняя выступает в данном случае в качестве интегрального показателя качества [18], который, в какой степени можно сравнить с функцией надежности Тагути.

К таким составляющим можно отнести:

- технологическую себестоимость формообразования режущих элементов резца (технологическая себестоимость у изготовителя);
- длину пути резания как функция фактора неравноценности значений показателя качества внутри допуска;

- длину пути резания как функция качества обработки рабочих элементов режущей части резца.

При этом последние два показателя косвенно отражают технологическую себестоимость у потребителя.

Технологическая себестоимость у изготовителя. Если принять значение технологической себестоимости у изготовителя при использовании способа 1 за 100%, то остальные методы будут располагаться следующим образом (см. рис. 8).

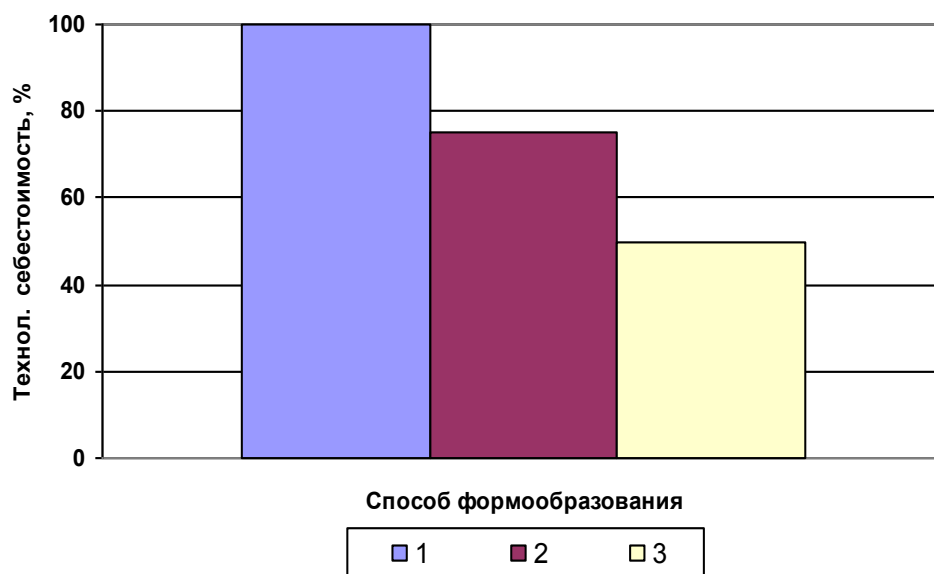


Рисунок 8 – Сопоставление технологической себестоимости при различных методах формообразования

Высокое значение технологической себестоимости при использовании способа 1 связана в первую очередь со значительным браком изделий по причине выхода размера за пределы допуска (провалы размеров во время мгновенного самозатачивания круга) и повышенного расхода алмазов круга. Способ 2 имеет худшие показатели по сравнению со способом 3 по причине дороговизны (капитальные затраты) и сложности оборудования, что влечет за собой увеличение затрат, связанных с технологией изготовления (основная и дополнительная заработная плата производственного рабочего и наладчика, затраты на электроэнергию, затраты на амортизацию оборудования, затраты на ремонт оборудования и приспособлений, затраты на режущий инструмент, затраты на содержание производственной площади, затраты на вспомогательные материалы).

Длина пути резания как функция фактора неравноценности значений показателя качества внутри допуска. Важность этого фактора

связана в первую очередь с тем, что в данном случае резец является мерным инструментом, т.к. его размер переносится на размер выполняемой канавки. Следовательно, резцы, изготовленные в пределах допуска на размер, не будут равноценны с точки зрения длины пути резания, которую они будут обеспечивать до момента достижения допустимой величины износа. В данном случае согласно техпроцессу наименьший изношенный размер резца составляет 0,96мм. Это означает, что резец, изготовленный в размер 1,02мм, может полностью реализовать свой ресурс (критерий износа при чистовой обработке, например, обрабатываемых материалов первой группы $h_3 \sim 0,05\text{мм}$ [19]), в то время как резец с размером 0,99мм нет. Таким образом, резец, изготовленный по верхнему предельному размеру, обеспечит большую длину резания по сравнению с резцом, изготовленным по нижнему предельному размеру.

Картину, максимально приближенную к реальной, можно проиллюстрировать схемой, приведенной на рис. 9.

Здесь B и b ширины паза и резца соответственно, а цифры относятся к способу формообразования его режущей части. Среднестатистический резец, изготовленный с допуском на ширину ($T_{b1,2}$) меньшим чертежного ($T_{b\text{черт.}}$) значения, имеет размер $b_{2,3}$. Поэтому в отличие от резца со среднестатистическим размером b_1 он имеет больший запас на износ. Следовательно, способ формообразования резца через уровень достижимой точности формирует его новое качественное состояние.

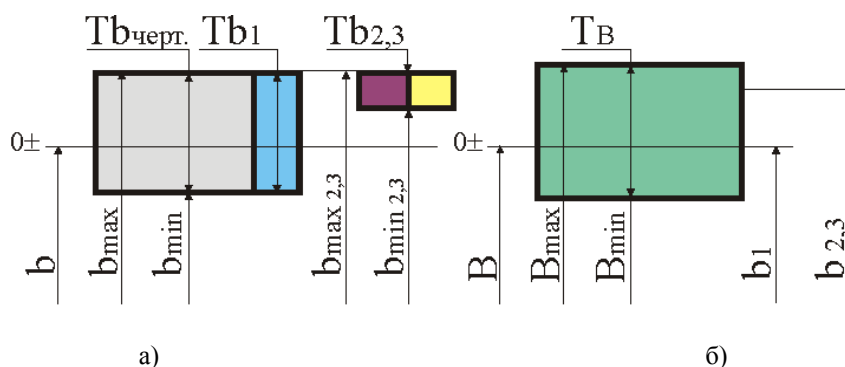


Рисунок 9 – Иллюстрация фактора неравноценности значений показателя качества внутри допуска

Если за 100% принять длину пути резания для способа 3, то остальные методы будут располагаться следующим образом рис. 10).

Объяснить приведенные данные можно следующим образом. При реализации первого метода размеры выполняются с использованием всего поля допуска. Два других способа практически равноценны по достигаемой точности ($\pm 2,5\text{мкм}$), а, значит, позволяют использовать при

изготовлении резца только часть поля допуска, которая в данном случае должна включать в себя верхнее предельное отклонение. Однако, как будет показано ниже, стойкость резца по способу 2 несколько ниже из-за худшего качества рабочих элементов.

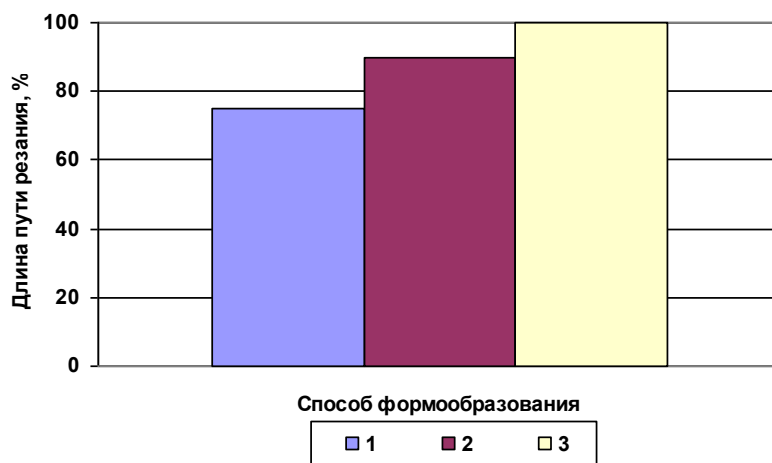


Рисунок 10 – Сопоставление длины пути резания при различных методах формообразования

Длина пути резания как функция качества обработки рабочих элементов режущей части резца. Наилучшее качество рабочих элементов резец будет иметь в случае использования способа 1. Очень близкие к этим показатели имеет резец, заточенный по способу 3. Способ 2 имеет худшие результаты из-за неравномерности воздействия электрических импульсов на гетерогенный материал. Особенно это касается качества режущих кромок, что связано с существованием так называемого «краевого» эффекта, описанного выше.

Для иллюстрации изложенного приведем, например, данные по величине радиуса округления режущих кромок (рис. 11).

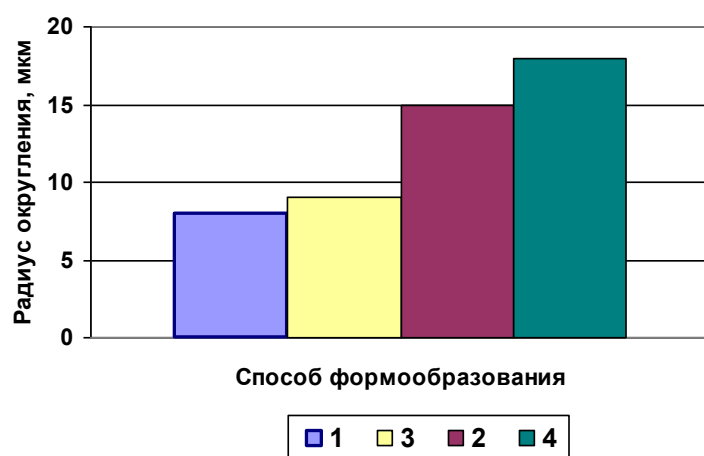


Рисунок 11 – Зависимость радиуса округления режущих кромок от метода формообразования

Здесь способ 4 соответствует заточке токопроводящим кругом на основе алмазных шлифовальных зерен зернистостью $Z=50/40$ в комбинированном процессе шлифования ([20], приведен для сравнения).

Если принять длину пути резания по способу 1 за 100%, то остальные методы будут располагаться следующим образом (рис. 12).

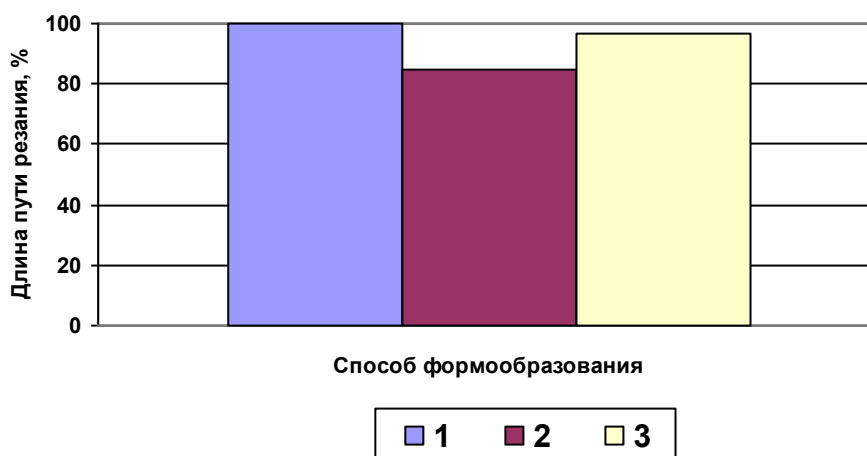


Рисунок 12 – Сопоставление длины пути резания при различных методах формообразования

Выводы и перспективы развития. 1. Выявлена ключевая роль процентного содержания металлической связки в составе ПСТМ в формировании качества режущих кромок при ЭЭО непрофилированными и профилированными электродами-инструментами. Неравномерность распределение связки в ПСТМ приводит как к возникновению отклонения режущей кромки от прямолинейности, что особенно характерно для ПСТМ с большим содержанием металлической связки, так и к появлению достаточно крупных кратеров (напоминающим сколы после шлифования), являющихся результатом удаления блока алмазных зерен, охваченных металлической связкой. 2. Установлено, что благодаря комбинированным процессам шлифования алмазные зерна с металлическими покрытиями не только могут быть использованы в кругах на прочных металлических (токопроводящих) связках, но, наоборот, в условиях, когда отсутствует внедрение шлифовальных зерен в обрабатываемый материал, имеющаяся возможность удаления материала (металла) покрытия (равно как и связки круга) электрофизикохимическим способом открывает новые перспективы в плане управления режущим рельефом круга. В частности, отдельно управляя интенсивностями электрофизикохимического удаления связки круга и материала покрытия (путем выравнивания их значений или

использования эффекта опережения одного из них), можно целенаправленно влиять на механизм износа алмазных зерен. 3. Для наиболее эффективного управления рабочей поверхностью круга следует использовать способ, основанный на комбинации процессов интенсивного электрохимического и локального электроискрового воздействия на связку круга. При этом основная часть погрешностей профиля РПК удаляется с помощью высокопроизводительного электрохимического, а окончательное его формообразование путем избирательного электроискрового воздействия. 4. Наиболее рациональное решение проблемы формообразования лезвийных инструментов из ПСТМ возможно на основе использования принципа выборочной предпочтительной целесообразной последовательности реализации достоинств различных процессов обработки. При этом наикратчайшим путем достижения высоких значений размерной точности и качества обработки является последовательное использование электроэрозионной обработки непрофилированным электродом – инструментом и комбинированные процессы алмазного шлифования с электрохимическим и электроискровым воздействием на рабочую поверхность круга соответственно. 5. Эффективность электроискрового процесса для управления РПК связана в первую очередь с возможностью реализации малых величин МЭЗ, поскольку его минимальные значения ограничиваются высотой рельефа круга. На практике это позволяет подводить в зону управления РПК электрические импульсы с малой энергией, а, следовательно, обеспечить высокие значения качества и точности управления РПК, что нашло свое подтверждение на практике. 6. Доказана эффективность использования токопроводящих кругов на основе микропорошков алмаза с рельефными толстослойными металлическими покрытиями в комбинированных процессах шлифования для решения проблемы формообразования прецизионных лезвийных инструментов из ПСТМ. Это во многом стало возможным благодаря использованию принципа выборочной предпочтительной последовательности применения достоинств различных процессов формообразования лезвийных инструментов из ПСТМ, что подтверждено оценкой, базирующейся на идее инжиниринга качества.

Список использованных источников: 1. Пыжов И.Н. Некоторые особенности электроэрозионной обработки сложных изделий из ПСТМ профилированным и непрофилированным электродами-инструментами / Пыжов И. Н. // Високі технології в машинобудуванні. Збірник наукових праць НТУ «ХПІ» - Харків: 2007.-Вип. 1 (14).-С. 70-79. 2. Пыжов И.Н. Некоторые особенности формообразования рабочих поверхностей лезвийных инструментов из ПНТМ при алмазном шлифовании /

Грабченко А. И., Пыжов И. Н. // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб.-Харьков: 2006.-Вып.70.-С. 132-137. 3. Пыжов И.Н. К особенностям обработки поликристаллических сверхтвердых материалов токопроводящими кругами на основе микропорошков алмаза / Грабченко А. И., Пыжов И. Н. // Високі технології в машинобудуванні. Збірник наукових праць НТУ «ХП».-Харків: 2006.-Вип. 2 (13).-С. 24-34. 4. Особенности применения токопроводящих кругов на основе микропорошков алмаза при заточке лезвийных инструментов из ПНТМ / [Грабченко А.И., Доброскок В.Л., Федорович В.А., Пыжов И.Н., Гаращенко Я.Н.] // Вестник национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт». Машиностроение.-К.: 2008.-Вип. 52.-С. 384–397. 5. Теоретическое обоснование эффективности использования микропорошков в алмазных кругах на металлических связках / Пыжов И.Н., Федорович В.А., Русанов В.В., Калита И.Н. // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб.-Харьков: 2008.-Вып.74.-С. 258-266. 6. Фадеев В.А. Формообразование высококачественных прецизионных сложнопрофильных лезвийных инструментов из ПСТМ. / [Фадеев В.А., Пыжов И.Н., Федорович В.А.] // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб.-Харьков: 2009.-Вып.76.-С. 225-235. 7. Аренков А.Б. Основы электро-физических методов обработки материалов / Аренков А.Б. - М.: Машиностроение, 1967.- 372с. 8. Магазеев М.Г. Повышение эффективности изготовления профильных инструментов из сверхтвердых и керамических материалов за счет сочетания электроэрозионной и алмазной обработки: дис...канд. техн. наук: 05.03.01/Магазеев Михаил Геннадиевич. - Харьков, 1997. - 204 с. 9. [Schneidstoffe in der holzbearbeitenden Industrie. http://www.idr-online.com/german/pages/archive/2003_2_/15_art/Art15_02_03.htm](http://www.idr-online.com/german/pages/archive/2003_2_/15_art/Art15_02_03.htm). 10. Spur G. Funkenerosives Trennen polykristalliner Diamantwerkzeuge / Spur G., Schönbeck J. // Industrie Diamanten Rundschau. - 1991. - №3. - S. 179-185. 11. Ставицкий Б.И. Особенности электроискрового формообразования в воде (из истории электроискровой обработки). Оборудование и инструмент для профессионалов (металлообработка) / Ставицкий Б.И. - М.: - 3 /2008. - С. 66 - 69. 12. [Funkenerosive Bearbeitung von Cvdite CDE und Syndite-Produkten. http://www.idr-online.com/german/pages/archive/2004_4/13_art/Art13_04_04.htm](http://www.idr-online.com/german/pages/archive/2004_4/13_art/Art13_04_04.htm). 13. Размерная электрическая обработка металлов: Учебное пособие для студентов вузов / [Б.А. Артамонов, А.Л. Вишницкий, Ю.С. Волков., А.В. Глазков]. Под ред. А.В. Глазкова. - М.: Высш. школа, 1978. -336с. 14. Попилов Д.Я. Электрофизическая и электрохимическая обработка материалов / Попилов Д.Я. - М.: Машиностроение, 1982. - 400с. 15. Семко М.Ф. Алмазное шлифование синтетических сверхтвердых материалов / Семко М.Ф., Грабченко А.И., Ходоревский М.Г. - Харьков: Вища школа, 1980. - 192 с. 16. Азарова Н.В. Расчет параметров шероховатости шлифованной поверхности с учетом радиальных колебаний рабочей поверхности круга / Азарова Н.В., Матюха П.Г. // Сверхтвердые материалы. - 2006. - № 3. - С. 52- 61. 17. Лапидус В.А. Гуру менеджмента качества и их концепции: Э. Деминг, Дж. Джуран, Ф. Кросби, К. Исикава, А. Фейгенбаум, Т. Тагути / Лапидус В.А. // <http://www.masters.donntu.edu.ua/2007/mech/tsunikova/library/2.htm>. 18. Узунян М.Д. Инжиниринг качества шлифования / Узунян М.Д. // Резание и инструмент в технологических системах. – 2005. - Вып. 69. - С. 329 - 334. 19].Робочі процеси високих технологій у машинобудуванні: підручник для студентів вищих навчальних закладів / Грабченко А.І., Вереzub М.В., Внуков Ю.М. та ін.; за редакцією А.І. Грабченка. - Житомир, ЖДТУ, 2003 р.- 451 с. 20. Русанов В.В. Исследование физических явлений и качества поверхности при алмазном шлифовании композиций «СТМ - сталь»: дис... канд. техн. наук 05.03.01 / Русанов Виктор Васильевич. - Харьков, 1980. - 259 с.

В.В. ГУСЕВ, д-р техн. наук,

Л.П. КАЛАФАТОВА, д-р техн. наук, Донецк, Украина

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ОБТЕКАТЕЛЕЙ РАКЕТ НА НАДЕЖНОСТЬ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Ймовірність безвідмовної роботи відповідальних виробів із кераміки – обтічників ракет залежить від параметрів дефектного шару їх поверхні. При шліфуванні, на етапі вибору схеми обробки, характеристики шліфувального круга і режимів різання, необхідно виходити з умов зниження рівня силової дії інструмента на поверхню, що формується, який забезпечує зменшення ймовірності розвитку дефектного шару, обумовленого процесом механічної обробки. За рахунок цього підвищується надійність експлуатації виробів.

Вероятность безотказной работы ответственных изделий из керамики - обтекателей ракет зависит от параметров дефектного слоя их поверхности. При шлифовании, на этапе выбора схемы обработки, характеристики шлифовального круга и режимов резания, необходимо исходить из условий снижения уровня силового действия инструмента на поверхность, которая формируется, который обеспечивает уменьшение вероятности развития дефектного слоя, обусловленного процессом механической обработки. За счет этого повышается надежность эксплуатации изделий.

Probability of faultless work of responsible wares from ceramics – cowlings of rockets depends on the parameters of imperfect layer of their surface. Choosing the chart of treatment, description of grinding wheels and cutting parameters during grinding it is necessary to come from the decline level of power influence of instrument on the formed surface, that provided theoretic frequency diminishing of imperfect layer, conditioned the machining job process, and this way marking up reliability of their exploitation.

Введение. В России и странах НАТО основными материалами головных антенных обтекателей высокоскоростных летательных аппаратов, управляемых методом радиолокационного наведения на цель, являются кварцевая и алюмосиликатная керамики, стеклокерамика литийалюмосиликатного состава (ОТМ357) и термостойкие стеклокристаллические материалы (ситаллы или ситаллокерамика) [1], которые также относятся к группе керамических материалов. Головной радиопрозрачный антенный обтекатель является важным элементом современных скоростных летательных аппаратов, управляемых методом

радиолокационного наведения. При эксплуатации в обтекателе возникают большие механические напряжения.

К изделиям радиотехнического назначения предъявляют высокие требования по точности формы, по отклонению от заданной толщины стенки ($\leq \pm 0,1\text{ мм}$) и качеству поверхности ($R_a \leq 2,5\text{ мкм}$). Это связано с необходимостью обеспечения требуемых радиотехнических характеристик изделия. Чем выше величина диэлектрической проницаемости материала изделия, тем более высокие требования предъявляются к нему по допускам на толщину стенки [2]. Необходимость механической обработки крупногабаритных изделий из ситаллокерамики связана со значительной усадкой материала (5,5-6%) при термообработке [1], что вызывает коробление заготовок. Одной из основных причин отказов сложных систем авиационной и ракетно-космической техники является разрушение входящих в их состав высоконагруженных деталей из конструкционной керамики, обусловленное повреждаемостью материала при формообразовании [3]. Повышение механической прочности, эрозионной стойкости, создание обтекателей с селективным пропусканием электромагнитной энергии в заданном интервале частот в настоящее время связано с усовершенствованием методов их механической обработки [1].

Остаточные напряжения, обусловленные механической обработкой, в серийно выпускаемых обтекателях из кварцевой керамики и ОТМ357 не превышают 1-1,2 МПа, что значительно меньше прочностных свойств керамики, и они не способны повлиять на их несущую способность в условиях эксплуатации. Однако прочность изделий из ситаллов в значительной степени зависит от наличия дефектов структуры материала и дефектов, вызванных механической обработкой, которые вызывают разрушение обтекателей при испытаниях и эксплуатации. Целью настоящей работы является исследование причин формирования дефектного слоя при механической обработке ситаллокерамических обтекателей, в частности из ситалла АС- 418, и анализ его влияния на прочность изделий.

Основное содержание. Основным показателем, характеризующим несущую способность деталей из керамики, является коэффициент запаса прочности, равный отношению допустимой прочности на растяжения материала σ_p к максимальному напряжению $\sigma_{\max}$, возникающему в нем от воздействия на деталь тепловых и силовых нагрузок. Как показали результаты прочностного расчета обтекателя, выполненные на основе моделирования напряженно-деформированного состояния оболочки

вращения под действием произвольной нагрузки и нагрева с учетом поперечного сдвига [3], максимальные напряжения, возникающие в материале оболочки из ситаллокерамики в ее наиболее нагруженном меридианном направлении, описываются нормальным распределением с математическим ожиданием $m(\sigma_{po}) = 44$ МПа и среднеквадратическим отклонением $s(\sigma_{po}) = 3$ МПа.

Зная математическое ожидание $m(\sigma_{po})$ и среднеквадратическое отклонение $s(\sigma_{po})$ прочности изделия после механической обработки, можно определить допустимое значение прочности σ_d , при котором с вероятностью 95% (99%) обеспечивается получение детали с гарантированной прочностью $\sigma_d = m(\sigma_{po}) - z \cdot s(\sigma_{po})$.

Известно [4], что поверхностная плотность дефектов структуры ситалла АС-418 $-n_c = (1,5..2,0) \times 10^9$ шт./м²; максимальные размеры дефектов структуры (за исключением дефектов материала в виде раковин) составляют 12,0 мкм, а параметр трещиноватости при учете только дефектов структуры $r_c = 12$; трещиностойкость ситалла $K_{1c} = 1,7 \pm 0,1$ МПа·м^{1/2}; индекс хрупкости - $HV/K_{1c} = 4,58$ мкм^{-0,5}. Структура дефектного слоя, вызванного механической обработкой и в основном определяемая максимальной полудлиной обработочных трещин $l_{o\max}$ и параметром трещиноватости r_o [5], зависит от индекса хрупкости обрабатываемого материала и уровня силового воздействия на обрабатываемую поверхность со стороны режущего инструмента, ухудшаясь по мере его увеличения.

Установлено [6, 7], что, в свою очередь, изменяя такие входные параметры технологического процесса обработки как схема и режимы шлифования, характеристика и степень износа алмазно-абразивного инструмента, свойства используемых СОТС, можно существенно воздействовать на силовые характеристик процесса шлифования, положительно влияя на структуру возникающего дефектного слоя. Исследование дефектности ситаллов осуществляли методом люминесцентной дефектоскопии в сочетании с послойным химическим травлением образцов. Для детального исследования дефектной поверхности использовался люминесцентный микроскоп серии “Люам”, позволяющий наблюдать и фотографировать изображение объекта в свете люминесценции при максимальном увеличении в 2500 крат. Травление образцов производилось от уровня обработанной поверхности с шагом 20

мкм. Общая глубина травления определялась выполнением требования выхода на слои материала, не содержащие дефектов, обусловленных обработкой. Контроль структуры дефектности на различных глубинах осуществлялся по цифровым фотоснимкам наиболее характерных участков поверхности образцов. По микрофотографиям дефектной поверхности определялся вид дефектов, и обсчитывались параметры дефектности с использованием специально разработанной программы на ЭВМ.

Оценка структуры дефектного слоя осуществлялась по следующим показателям: глубина проникновения дефектов (h_d , мкм), определяемая выходом на уровень травления, соответствующий полному отсутствию дефектов, вызванных обработкой; относительная плотность дефектов (S_{om} , %), определяемая отношением площади, занятой дефектами, ко всей исследуемой площади образца; относительная объемная плотность дефектов в разрушенном обработкой слое (V_{om} , %), определяемая отношением объема, занятого дефектами обработки, ко всему объему поверхностного слоя образца, нарушенного обработкой.

Так, например, зная зависимость нормальной составляющей силы резания P_y от режимов обработки при продольном круглом шлифовании (скорости круга v_k , скорости заготовки v_d , глубины резания t и продольной подачи s)

$$P_y = 75,3v_k^{-0,55}s^{0,68}t^{0,92}v_d^{0,7},$$

можно получить следующие параметры структуры обработочных дефектов (рис. 1).

Интенсивность развития дефектного поверхностного слоя изделий при механической обработке ситаллов определяется уровнем нормальной составляющей силы резания P_y , которая, в свою очередь, зависит от уровня параметров режима шлифования. Действительно, при увеличении параметров режима резания, прежде всего скорости перемещения детали v_d (или вращения детали w_o) и глубины шлифования t и, как следствие, роста силы P_y относительная плотность дефектов возрастает, достигая максимальных значений на глубине 70...100мкм (см. рис.1).

Графики, представленные на рис. 1, иллюстрируют изменение относительной плотности дефектов в зависимости от глубины залегания для различных условий шлифования, представленных минимальным и максимальным уровнем варьируемых параметров. Как видно из этих

рисунков, полученные экспериментальные зависимости $S_{om} = f(h_d)$ имеют экстремальный характер при обработке ситалла на всех режимах. Причем максимальная плотность и размеры дефектов приходятся на интервал глубин $h_d = 60-90$ мкм.

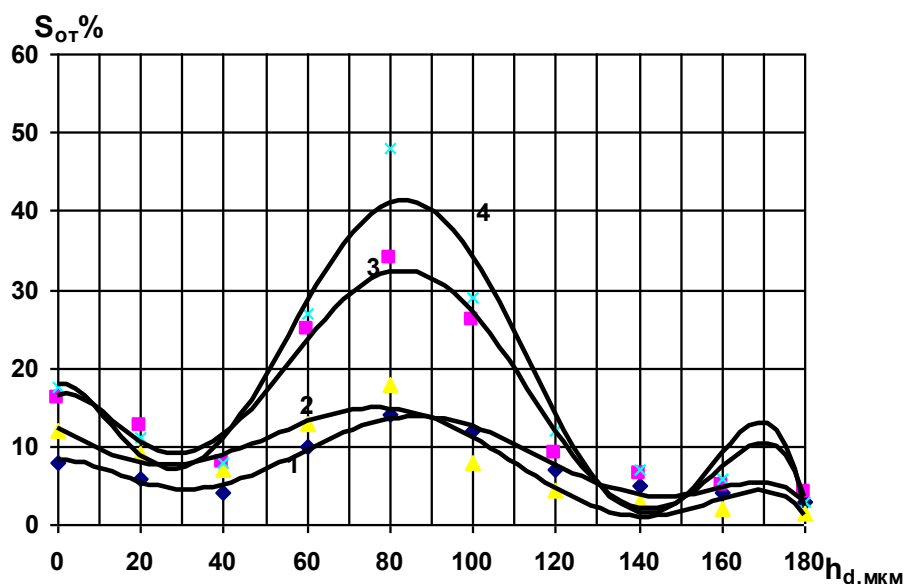


Рисунок 1 – Зависимость относительной плотности дефектов от глубины залегания при шлифовании ситалла АС-418 алмазным кругом зернистости 125/100 с режимами $V_k = 33$ м/с: 1- $t = 0,3$ мм, $S = 14,5$ мм/мин, $W_d = 10,5$ л/с; 2 - $t = 0,9$ мм, $S = 14,5$ мм/мин, $W_d = 10,5$ л/с; 3 - $t = 1,4$ мм, $S = 14,5$ мм/мин, $W_d = 10,5$ л/с; 4 - $t = 0,9$ мм, $S = 23,0$ мм/мин, $W_d = 10,5$ л/с.

Зависимости $S_{om} = f(h_d)$ в рассматриваемом диапазоне глубин залегания (0-180 мкм) имеют идентичный характер при всех сочетаниях параметров обработки. Исходная относительная плотность дефектов несколько выше, чем при $h_d = 30-40$ мкм. При шлифовании ситалла алмазным кругом указанной зернистости ее значение лежит в интервале 8-17% и имеет тенденцию к возрастанию с повышением интенсивности обработки (см. рис. 1, кривые 3, 4). На этих же режимах достигаются максимальные значения S_{om} . Увеличение глубины резания в 4,7 раза приводит к росту S_{om} в 2,5 раза, а увеличение подачи в 1,6 раза сопровождается приблизительно таким же возрастанием S_{om} (в 2,7 раза), оставаясь при этом на 30% большим, чем при увеличении t . Приведенные

результаты свидетельствуют о том, что увеличение подачи по сравнению с увеличением глубины вызывает более интенсивное возрастание плотности дефектов в зоне ее максимальных значений. Увеличение скорости вращения детали на 20% приводит к возрастанию S_{om} в пределах 5-10%, что объясняется увеличением сил резания, и по максимальному уровню соответствует кривой 4 на рис. 1.

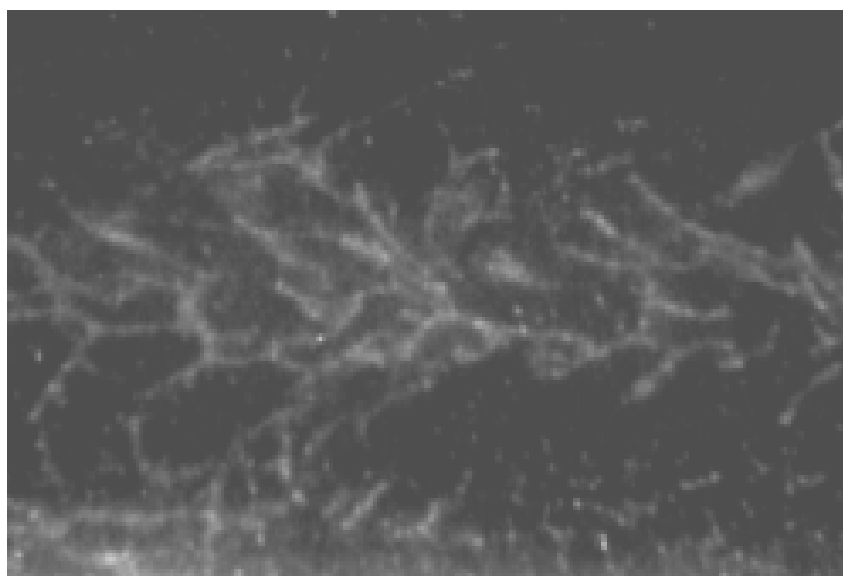


Рисунок –2 Обработочная дефектность шлифованной поверхности образца из ситалла АС-418 (после удаления рельефного слоя на глубину 0,01мм); режимы шлифования $v_k=32\text{м/с}$, $v_d=32\text{м/мин}$, $t=0,3\text{мм}$. Увеличение $\times 150$.

При этом относительная плотность дефектов, обусловленных обработкой, по глубине изменяется нелинейно. Происходит чередование участков поверхностей образца с максимальной и минимальной относительной плотностью дефектов. Периодическое изменение плотности дефектов по глубине образца связано с ветвлением трещин (дефектов обработки), возникающих в объеме обрабатываемого образца при определенных условиях его нагружения, и последующим периодическим выходом ветвящихся трещин на уровень стравливаемой поверхности. Такое явление называют бифуркацией [8]. Интегральным показателем качества структуры дефектного слоя деталей из ситалла может служить относительная объемная плотность дефектов в нарушенном обработкой поверхностном слое образца.

Как показали результаты выполненных исследований, поверхностная плотность обработочных дефектов n_o для ситалла АС-418 составляет

порядка 4×10^6 шт./м², при этом максимальные обработочные дефекты располагаются на глубине 60...100 мкм (см. рис.1), что можно учесть при определении предельного разрушающего усилия введением соответствующего коэффициента расположения трещины k_p . (для трещины на поверхности $k_p=1,11$, в остальных случаях $k_p=1$) и k_ϕ – коэффициента, учитывающего соотношение полудлины l и глубины трещины h_T , оказывающих влияние на интенсивность напряжений. Может быть учтено, что $k_\phi = \frac{1 + 4,5(l/h_o)^4}{1 - (l/h_o)}$ при отношении $l/h_o \leq 0,5$ и $k_\phi = \sqrt{1 + 2(l/h_o)}$ при $l/h_o \leq 0,25$.

Кроме этого необходимо учитывать расположение трещин обработки относительно наиболее нагруженного меридианного направления. Дефекты обработки ориентированы от указанного направления под углом 0-60° (рис.2).

Определение значений $m(\sigma_{po})$ $s(\sigma_{po})$ с учетом наличия двух видов дефектов (структурных и обработочных) произведем в соответствии с зависимостью, приведенной в работе [10]. Как показали расчеты, увеличение режимов резания при чистовом продольном круглом шлифовании ситалла АС-418 приводит к существенному снижению средней прочности деталей (рис. 3).

С учетом масштабного фактора прочность изделия снижается до $m(\sigma_{po})=56$ МПа при среднеквадратическом отклонении $s(\sigma_{po})=6$ МПа. Если в дальнейшем не производить обработку изделия, обеспечивающую удаление дефектного слоя, вероятность безотказной его эксплуатации составит лишь 0,75, что является не допустимым для данного класса изделий. Вероятность безотказной работы изделия должна быть не менее 0,98, что соответствует допустимой прочности обтекателей 93 МПа [3]. При отсутствии в поверхностном слое изделия дефектов обработки и дефектов материала в виде раковин расчетная прочность такого материала составляет 140 МПа. Удаление дефектного слоя, вызванного обработкой, позволяет получить 98% изделий с гарантированной прочностью на изгиб 180 МПа при среднеквадратическом отклонении $s(\sigma_u)=30$ МПа [4]. При

этом вероятность того, что предел прочности изделия будет меньше допустимого, исходя из условий эксплуатации, не превышает 0,4 %.

Таким образом, при обработке комбинированно-дефектных ситаллов, к которым относится ситалл АС-418, необходимо усовершенствование технологического процесса (ТП) механической обработки с целью уменьшения или полного устранения вызванного ею дефектного слоя. Одним из условий усовершенствования ТП является выбор инструмента и схемы обработки изделий.

При алмазном шлифовании внутреннего контура обтекателей из ситалла его формирование производится последовательно несколькими инструментами различных видов и типоразмеров. В местах контура изделия, в которых осуществляется переход от одного вида инструмента к другому, возникают наибольшие по величине и глубине трещины. Если эти трещины не удалить, то они могут спровоцировать разрушение изделия. Глубина проникновения подобных трещин достигает 0,3 ..0,4 мм.

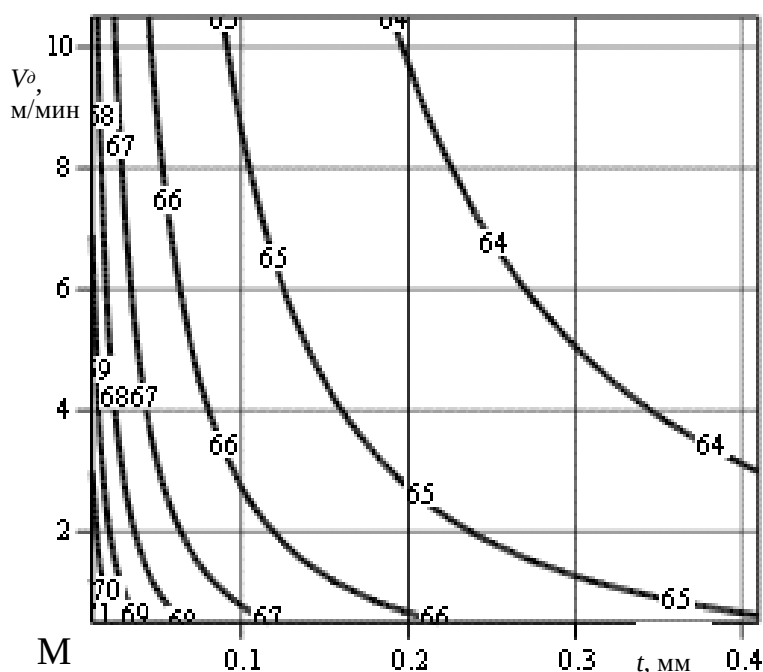


Рисунок 3 – Зависимость средней прочности $m(\sigma_{po})$, МПа ситалла АС-418 в зависимости от скорости детали v_d и глубины t резания при продольном круглом шлифовании кругом 1А1 200-10-3-60-76 АС6 125/100-4- М2-01 и скорости резания $v_k = 30$ м/с

Особые трудности вызывает обработка вершины внутреннего контура обтекателя, реализуемая путем сверления алмазным кругом в сплошном материале. Данный переход характеризуется высокой трудоемкостью и сопровождается формированием массивного дефектного слоя большой глубины. Устранение возможности возникновения трещин в местах стыковки кругов различного диаметра при формировании внутреннего контура изделия обычными технологическими приемами вызывает трудности, поэтому за рубежом в этих целях применяют специальный инструмент [9]. Для снижения трудоемкости обработки вершины конического отверстия обтекателей были разработаны схемы сверления (А.с. СССР №1463403, А.с. СССР №1808498) и конструкции специального алмазного инструмента, устраняющие «подрезы» при обработке внутреннего контура изделия. Также разработаны способы шлифования (патент України №54942, Деклараційний патент на винахід. Україна (UA). 65894 А), обеспечивающие перераспределение припуска по рабочей поверхности круга и за счет этого формирование заданной структуры поверхностного слоя керамики, что позволяет сократить продолжительность механической обработки при обеспечении эксплуатационных характеристик изделий.

Тем не менее, после механической обработки ответственных изделий, к которым относятся и обтекатели из ситалла, в производственных условиях удаляют оставшийся после обработки дефектный слой методом химического травления с последующим ионным упрочнением формируемой поверхности. Операция травления экологически вредна и значительно повышает трудоемкость изготовления обтекателей. С уменьшением глубины дефектного слоя снижается трудоемкость его удаления при травлении обработанной поверхности.

Выводы. Таким образом, можно заключить, что структура и физико-механические характеристики ситалла обеспечивают требуемую прочность обтекателей, но наличие в их поверхностном слое обработочных дефектов уменьшает вероятность безотказной работы изделий ниже допустимого уровня, то есть, меньше 0,98. При шлифовании, выбирая схему обработки, характеристику шлифовального

круга и режимы резания, необходимо исходить из снижения уровня силового воздействия инструмента на формируемую поверхность, что обеспечивает уменьшение вероятности развития дефектного слоя, обусловленного процессом механической обработки, в глубину изделия. Это позволит существенно снизить трудоемкость обработки изделия, прежде всего, экологически небезопасной операции химического травления.

Список использованных источников: 1. Суздальцев Е.И. Радиопрозрачные, высокотермостойкие материалы XXI века // Огнеупоры и техническая керамика. – 2002. – №3. – С.42-50. 2. Исследование влияния режимов механической обработки ситаллокерамических изделий в системе: станок – изделие – инструмент - схема / Е.И. Суздальцев, А.С. Хамицаев, А.Г. Эпов, Д.В. Харитонов // Огнеупоры и техническая керамика. – 2003. – №7. – С.23-30. 3. Анализ соответствия прочности стеклокерамики ОТМ357 требованиям к конструкции обтекателя / Е.И. Суздальцев, М.Ю. Русин, В.И. Куракин, А.С. Хамицаев // Огнеупоры и техническая керамика. – 2004. – №7. – С.9-12. 4. Дубовик В.Н., Райхель А.М. Дефектность и уровни прочности ситаллов // Проблемы прочности. – 1984. – №7 – С.79-84. 5. Гусев В.В. Силы резания и формирование дефектного слоя при алмазном шлифовании керамики // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ: ДДМА. – 2003.- Вип. №13. – С. 70-76. 6. Калафатова Л.П. Возможности управления дефектностью шлифованной поверхности материалов на основе стекла за счет изменения параметров технологического процесса обработки // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Междунар. сб. научн. трудов. - Донецк: ДонГТУ. - 1999. - Вип. 8. - С. 100 -108. 7. Калафатова Л.П. Влияние схемы шлифования на надежность процесса обработки изделий из стекломатериалов // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: Зб. наук. праць. - Краматорськ: ДДМА - 1999. - Вип. 9. - С. 218-221. 8. Селиванов В.В. Механика разрушения деформируемого тела: Учебник для втузов. Прикладная механика сплошных сред; Т.2. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. – 420с. 9. Витвицкий П.М., Пожени С.Ю. Прочность и критерии хрупкого разрушения стохастически дефектных тел - Киев: Наукова думка, 1980. - 187с. 10. Гусев В.В. Технологическое обеспечение эксплуатационных требований к изделиям из конструкционной керамики // Резание и инструмент в технологічних системах: Междунар. науч.-техн. сб. – Харьков: НТУ „ХПИ”, 2007. – Вип.73. – С.55-62. 11. Thomas F. One grinder conquers nose cone // Grinding finishing. – 1963. – Vol.9, №9. – P.32-35.

B. KARPUSCHEWSKI, Prof. Dr.-Ing. habil.,
D. MOUREK, Dipl.-Ing.,
O. KUSHNARENKO, Dr.-Ing., Magdeburg, Germany

ENTWICKLUNG EINES POSTPROZESSORS FÜR DAS 5-ACHS-SCHLEIFEN

У статті представлені результати по розробці постпроцесора для п'ятивісної шліфувальної машини Walter Helitronic. Для диференціювання функцій формоутворення використовували множення матриць перетворення. Для розробленої кінематичної моделі шліфувального верстата визначена інверсна кінематично для поступальної й обертальної осі. Алгоритми були виконані мовою програмування JAVA і перевірені експериментально при виготовленні двох різних типів різальних інструментів.

В статье представлены результаты по разработке постпроцессора для пяти осной шлифовальной машины Walter Helitronic. Для диференцирования функций формообразования использовалось умножение матриц преобразования. Для разработанной кинематической модели шлифовального станка определена инверсная кинематически для поступательной и вращательной оси. Алгоритмы были выполнены языке программирования JAVA и проверены экспериментально при изготовлении двух различных типов режущих инструментов.

In this article, the postprocessor for a five-axis tool grinder Walter Helitronic was developed. For the derivation of a form shaping function the multiplication of transformation matrices is used. For developed kinematic model of the grinder the solution of inverse kinematics for rotational and translational axes was found. The algorithms were implemented in JAVA and used for experimental verification during manufacturing of two different types of cutting tools.

Einleitung

Die frei geformten Bauteile können in bestimmten Fällen neben dem Fräsen auch mithilfe des Schleifens effektiv bearbeitet werden. Für das Fünf-Achs-Schleifen lassen sich die Werkzeugschleifmaschinen sehr gut anwenden. Für die technologische Fertigungsvorbereitung auf den NC-Maschinen sind folgende Schwerpunkte von sehr hoher Bedeutung. Es handelt sich um die CAD/CAM (Computer Aided Design/ Computer Aided Manufacturing) Systeme, CNC-Postprozessoren, Werkzeugschleifmaschinen und Schleifscheiben. All diese Elemente haben einen deutlichen Einfluss auf die Qualität und Effektivität des Fertigungsprozesses und sollen daher beobachtet werden.

CAD/CAM Systeme

Die Systeme für rechnerunterstützte Konstruktion, bzw. Fertigung oder Analyse, finden zurzeit in der Industrie eine breite Anwendung. Sie dienen zur Erhöhung der Produktivität und der Qualität während des ganzen Lebenszyklus eines Produkts.

Die Historie der CAD/CAM Systeme fängt in den fünfzig Jahren mit der Entwicklung der Programmiersprache APT (Automatically Programming Tools) an. Mithilfe dieser Sprache konnten die NC-Maschinen programmiert werden. Das APT-System wurde für die Bearbeitung der komplizierten dreidimensionalen Bauteile, die in der Luftfahrtindustrie benötigt wurden, entwickelt. Die festgestellten Koordinaten der NC-Bahn wurden in einem standardisierten Dateiformat CLDATA (Cutter Location Data) gespeichert und in den Postprozessor exportiert. Um die Möglichkeiten der neuentwickelten NC-Werkzeugmaschinen zu unterstützen, wurde das APT-System mehrfach um neue Funktionalität erweitert [1, 2].

In der Mitte der siebziger Jahre wurde die Entwicklung der CAx Systeme CATIA (Conception Assistée Tri-dimensionnelle InterActive) und UNIGRAPHICS angefangen. Beide Systeme wurden für die Bedürfnisse der Luftfahrtindustrie entwickelt und mit ihren Funktionen umfassen die Ingenieursarbeiten während des Produktlebenszyklus. So können die Arbeiten auf einem Produkt ab ersten Entwürfen über die Konstruktion, die Analysen, die Fertigung bis hin zur Demontage in einem System durchgeführt werden [3, 4].

Eigenschaften der CAD Systeme

Die modernen CAD Systeme basieren vor allem auf der dreidimensionalen Modelldarstellung. Die zweidimensionale Visualisierung findet ihre Anwendung nur bei den einfachen Systemen oder bei speziellen Lösungen, wie z. B. für die Bildung der 2D-Skizzen in 3D Systemen. Die Modellierung in den meisten CAD Systemen kann mithilfe der Volumen oder Flächen, bzw. mit der Kombination beider Methoden, realisiert werden. Die Volumenmodellierung arbeitet nur mit den Daten auf der Körperebene. Bei den Flächenmodellen können im Vergleich zur Volumenmodellierung nur die einzelnen Oberflächen erzeugt und manipuliert werden. Weil bei der Volumenmodellierung die einzelnen Oberflächen nicht manuell erzeugt werden müssen, ist dieses Verfahren im Vergleich zur Flächenmodellierung schneller. Auf der anderen Seite können die Volumenmodelle auf der Oberflächenebene nicht modifiziert werden, d. h. es die Produkte, deren Form durch Freiformflächen beschrieben ist, nicht modelliert werden. Die besseren modernen CAD Systemen bieten eine Möglichkeit der Hybridmodellierung, so dass die Modelle mithilfe der beiden Verfahren erzeugt werden können [5].

In Zusammenhang mit der Modellierung in CAD Systemen werden oft drei Techniken verwendet. Es handelt sich um die Features, der parametrischen Modellierung und der Assoziativität. Diese Features (Funktionen) sind die geometrischen Objekte, die bei der Bildung eines Volumenmodells nacheinander verwendet werden. Ein Beispiel dieser Modellierungstechnik stellt das Feature Bohrung dar. Bei einer Bohrung können die geometrischen Kenngrößen, wie z. B. Lage und Durchmesser, sowie die anderen Kenngrößen, wie z. B. Oberflächengüte bestimmt werden. Die modernen CAD Systemen unterstützen oft die parametrisch-assoziative Modellierung. Parametrisierung bedeutet, dass die Kenngrößen des Modells, wie z. B. Bemaßungen, beliebig geändert werden können. Die Assoziativität ist mit der vernetzten Struktur des Modells, in der jedes Objekt aus den Vorgabeobjekten entsteht und für weitere Objekte als eine Vorgabegeometrie dienen kann, verknüpft [3].

Geometrische Modellierung in CAD/CAM Systemen

Die interne Datenrepräsentation kann mithilfe vieler Verfahren beschrieben werden. Es können die CSG (Constructive Solid Geometry) Modelle [6] als auch B-Rep (Boundary Representation) Modelle [7] verwendet werden. Die Kerne von den CAD/CAM Systemen können bei manchen geometrischen Objekten, wie z. B. planaren oder zylindrischen Flächen, die mathematisch exakten Lösungen berechnen. Außerdem verfügen die Kerne über Ansätze, die nur die angenäherten Lösungen angeben.

Die Kurven und Flächen werden oft mithilfe der parametrischen Funktionen beschrieben. Bei der parametrischen Beschreibung sind die Koordinaten des Punktes auf der Kurve bzw. der Fläche, aufgrund der expliziten Beziehungen des unabhängigen Parameters beschrieben. Da bei der Arbeit mit CAD/CAM Systemen die ebenflächige oder zylindrische Geometrie nur eine beschränkte Anwendung findet, werden in Kernen von CAD/CAM Systemen auch die Ansätze von Modellierung der gekrümmten Kurven und Flächen verwendet.

Die Freiformkurven und –flächen können auf unterschiedliche Weise mathematisch beschrieben werden. Allgemein können zwei Verfahren unterschieden werden und zwar die Approximations- und Interpolationskurven und –flächen. Beide Gruppen der geometrischen Objekte sind u. A. durch Kontrollpunkte angegeben. Die Approximationskurve nähert sich den Kontrollpunkten an. Die Interpolationskurve im Unterscheid zur Approximationskurve läuft genau durch die angegebenen Punkte.

Bei den Freiformkurven und –flächen ist meistens ein ganz konkreter Stetigkeitsgrad gewünscht, z. B. C1 (Tangentialität) bzw. C2 (Krümmung), bei

den A-Klasse -Freiformflächen auch C3 (tangentialer Krümmungsverlauf). Für die Modellierung der Freiformkurven und -flächen wurden verschiedene Methoden entwickelt. Für die Modellierung der Interpolationskurven können z. B. kubische Spline-Kurven verwendet werden. Ein kubischer Spline ist eine glatte Kurve, die aus einzelnen Stücken (kubischen Parabeln) zusammengesetzt ist. Die Modellierung besteht in der Lösung eines Systems von Gleichungen, die aufgrund der Randbedingungen definiert sind. Die Lösung des Gleichungssystems sind die Koeffizienten der kubischen Funktionen, die die einzelnen Stücke der kubischen Spline-Kurve bestimmen. Ein Nachteil des kubischen Splines ist eine globale Mimik (Änderung der Lage eines Punktes beeinflusst die Form der ganzen Kurve).

Die approximativen Kurven können z. B. mithilfe der Bézier-Kurven oder der B-Spline-Kurven modelliert werden. Zu den Eigenschaften der Bézier-Kurven und -Flächen gehört z. B. die affine Invarianz. Das bedeutet, dass das Kontrollpolygon zuerst transformiert und die Bézier-Kurve erst danach berechnet werden kann. Die Bézier-Kurven und -flächen verfügen ähnlich wie die kubischen Spline über eine globale Mimik. In Bild 1 ist ein Beispiel einer Bézier-Fläche zusammen mit dem Kontrollpolygon dargestellt.

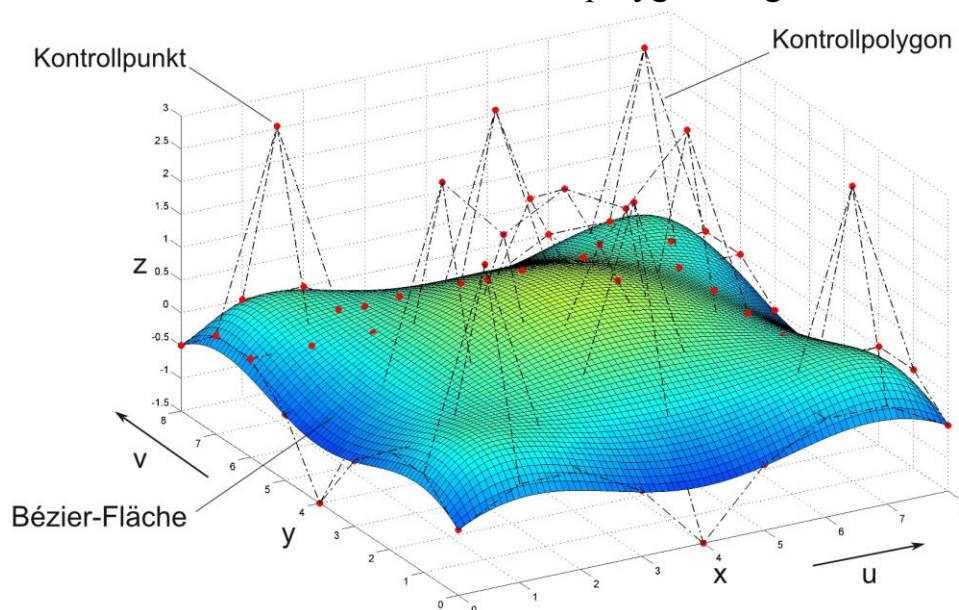


Bild 1 – Bézier-Fläche mit Kontrollpolygon

Für die Berechnung der Koordinaten eines Punktes auf der Bézier-Fläche der (n, m) -ter Ordnung kann die Formel 1 verwendet werden. $P_{i,j}$ sind die Punkte des Kontrollpolygons und $B_{i,n}(u)$ und $B_{j,m}(v)$ stellen die Bernsteinpolynome dar. Die Koordinaten des beliebigen Punktes können durch einsetzen der beiden Parametern berechnet werden.

$$S(u, v) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m P_{i,j} B_{i,n}(u) B_{j,m}(v) \quad 0 \leq u, v \leq 1 \quad (1)$$

Die Bernsteinpolynome aus Gleichung 1 sind nach der Formel 2 definiert.

$$B_i^n(u) = \binom{n}{i} u^i (1-u)^{n-i} \quad (2)$$

Eine weitere Möglichkeit die komplizierten Freiformkurven und –flächen zu beschreiben bieten die NURBS (Non Uniform Rational B-Splines). Die rationale Spezialisierung besteht in der Anwendung der entsprechenden Gleichungen für die Bézier-Kurven und B-Splines im Raum der homogenen Koordinaten. Die Anwendung der rationalen Spezialisierung ermöglicht die Beschreibung der Kegelschnitte, die affine Invarianz ist auf die projektive Invarianz zu erweitern. Dazu können zur Beeinflussung der Form, der Kurve und der Fläche auch die Punkte des Kontrollpolygons verwendet werden. Der Einfluss der Gewichte auf die Form der NURBS Kurve ist im Bild 2 dargestellt. Durch diese Eigenschaften sind die NURBS die meist verwendeten Objekte bei der mathematischen Modellierung in den Kernen der CAD/CAM Systeme [8, 9].

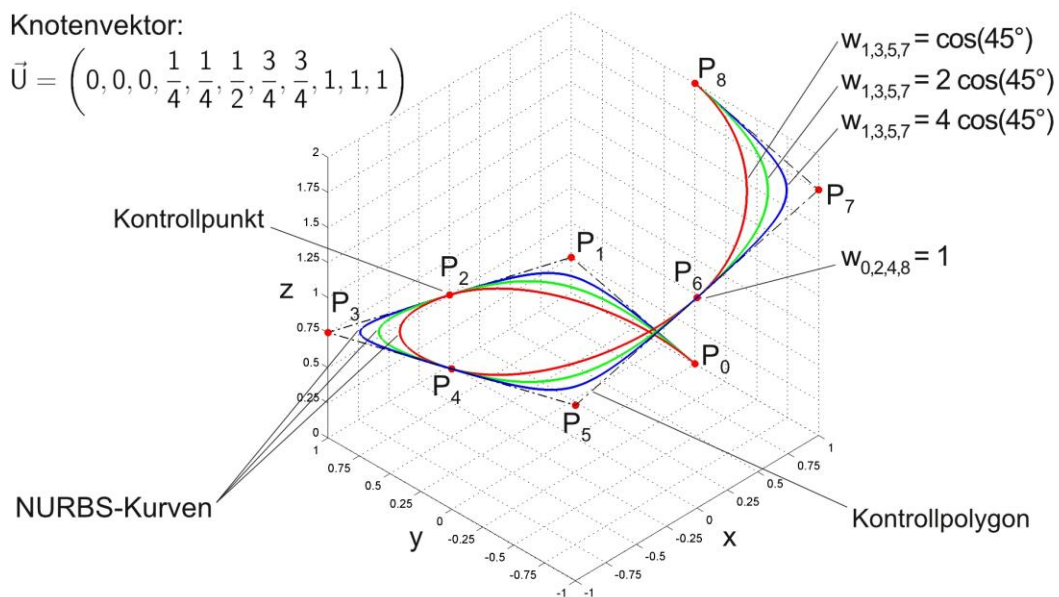


Bild 2 – Darstellung der NURBS Kurven mit unterschiedlichen Gewichten

Eine NURBS Kurve der p-ten Ordnung ist nach der Formel 3 definiert. P_i sind die Punkte, die den Kontrollpolygon bilden, w_i sind die entsprechende Gewichte der Kontrollpunkte und $N_{i,p}(u)$ sind die B-Spline Basisfunktionen des p-ten Grades, die auf dem nichtperiodischen nichtuniformen Knotenvektor definiert sind [10].

$$C(u) = \frac{\sum_{i=1}^n N_{i,p}(u) w_i P_i}{\sum_{i=1}^n N_{i,p}(u) w_i} \quad a \leq u \leq b \quad (3)$$

Die B-Spline Basis-Funktionen können unterschiedlich definiert werden. Für die Algorithmisierung ist eine rekursive Formel 4 sehr praktisch. Die i-te Basisfunktion der p-ten Ordnung ist folglich definiert.

$$N_{i,0}(u) = \begin{cases} 1 & u_i \leq u < u_{i+1} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (4)$$

$$N_{i,p}(u) = \frac{u - u_i}{u_{i+p} - u_i} N_{i,p-1}(u) + \frac{u_{i+p+1} - u}{u_{i+p+1} - u_{i+1}} N_{i+1,p-1}(u)$$

Der Knotenvektor U ist nach Formel 5 definiert. Mithilfe dieses Vektors ist bestimmt, wie und wo die Kontrollpunkte die NURBS Kurve beeinflussen.

$$U = \left(\underbrace{a, \dots, a}_{p+1}, u_{p+1}, \dots, u_{m-p-1}, \underbrace{b, \dots, b}_{p+1} \right) \quad (5)$$

Eigenschaften der CAM Systeme

Die Aufgabe der CAM Systeme ist die Vorbereitung der technologischen Daten, die zur Steuerung der CNC-Maschinen verwendet werden können. Zur Beschleunigung des ganzen Vorgangs werden meistens die gleichen Modelle, die im CAD System vorbereitet wurden, verwendet. Durch die Anwendung schon vorbereiteter Geometrien können die potentialen Fehler vermieden werden. Durch die Benutzung der schon fertigen Modelle wird auch die Zeit für die technologische Vorbereitung gespart. Die Modelle werden in die üblichen CAM Systeme in den neutralen Datei-Formaten, wie z. B. IGES oder STEP, übertragen. Diese Formate dienen zur Übergabe der Geometrie, jedoch gehen die Parametrisierung und Assoziativität während der Konvertierung verloren. Bei den großen CA-x Lösungen, wie z. B. CATIA V5, SIEMENS NX oder kombinierten Lösungen wie z. B. CIMATRON, verläuft die Arbeit über ursprünglichen Datenmodell. Das bedeutet, dass die Modelle ihre Parametrisierung und Assoziativität beibehalten, und nur um die technologischen Daten ergänzt werden. Das hat einen Vorteil und zwar, dass die Geometrie des Modells geändert werden kann und die Bahnen des Werkzeugs in den bestimmten Fällen automatisch aktualisiert werden können.

Die CAM Systeme unterstützen eine breite Menge der Fertigungsverfahren. Es wird z. B. Drehen, Fräsen, Bohren, Drahterodieren,

Wasserstrahlschneiden u. a. unterstützt. Für das beantragte Projekt ist nur das Fräsen von hoher Bedeutung. Das Fräsen wird in den CAM Systemen von 2 bis 5-Achs-Bearbeitung unterstützt. Für die Bearbeitung der komplizierten Freiformflächen werden die Frässtrategien, die mindestens drei simultan gesteuerte Achsen programmieren können, verwendet. Weil die Eingriffsbedingungen oft sehr anspruchsvoll sind, werden die drei translatorische Achsen um den Vorhalte- und Neigungswinkel der Werkzeugachse ergänzt. Für die Bewegung des Werkzeugs entlang einer Fläche gibt es mehrere Möglichkeiten. Die Wahl der richtigen Strategie für eine Oberfläche ist eine Kombination der Möglichkeiten des CAM Systems und der Erfahrungen des Anwenders. In Bild 3 ist eine mehrachsige Bearbeitung, bei der die Kontaktlinie zwischen dem Werkzeug und der Oberfläche tangential verläuft, dargestellt.

Bei der Berechnung der Werkzeugwege können auch die Spannmittel und der Werkzeughalter mitberücksichtigt werden. Vor allem bei der mehrachsigen Bearbeitung müssen aufgrund der veränderlichen Orientierung der Werkzeugachse die möglichen Kollisionen in Betracht gezogen werden.

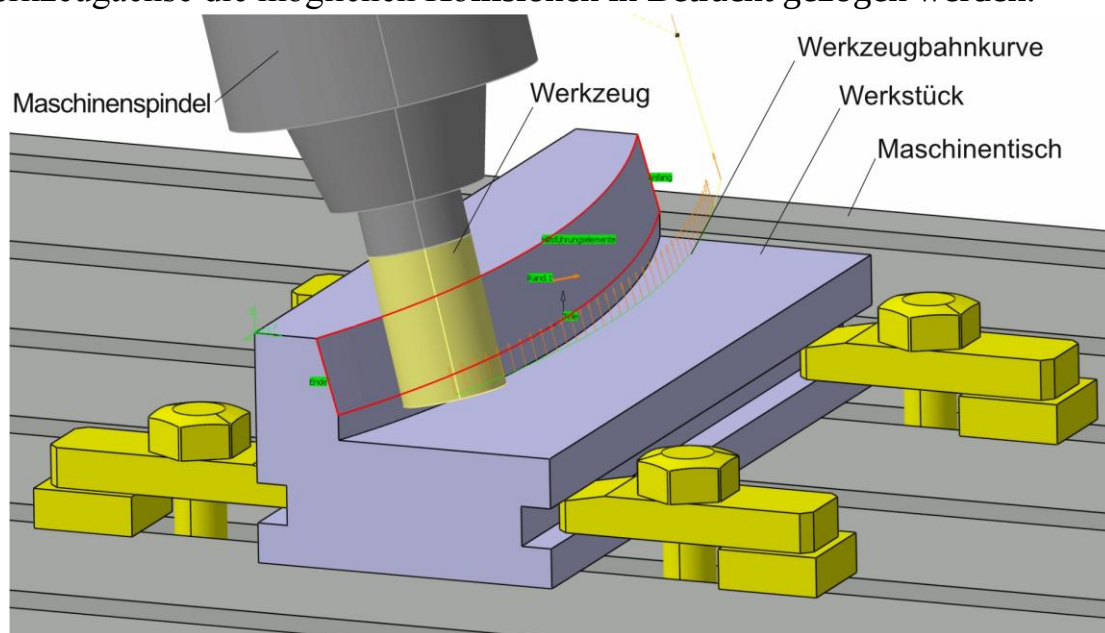


Bild 3 – Simultane-5-Achs-Bearbeitung

Die im CAM System implementierten Bearbeitungsstrategien bestimmen, wie die Bewegung des Werkzeugs in Bezug auf das Koordinatensystem des Werkstücks realisiert wird. Auf dem Markt sind allgemeine CAM Systeme sowie auch spezielle Lösungen, wie z. B. für die Turbinenschaufelbearbeitung, verfügbar [11].

Für das Schleifen der Freiformflächen sind die CAM Systeme nicht allgemein anwendbar, aber durch richtige Wahl der Bearbeitungsstrategien können die Frässtrategien auch für das Schleifen verwendet werden.

CNC-Postprozessoren

Die Information über die Lage und Orientierung des Werkzeugs wird im CAM System oft in eine maschinenneutrale Datei, z. B. die CL-Daten im APT Format, gespeichert. Diese Daten sind dann im Postprozessor ins NC-Programm für die konkrete Werkzeugmaschine konvertiert (s. Bild 4). Ein Vorteil der getrennten Verarbeitung der NC-Programme besteht darin, dass nur eine allgemeine Datei im CAM System vorbereitet werden muss. Diese Datei kann dann ins NC-Programm für unterschiedliche Maschinen mit diversen Steuerungssystemen umgewandelt werden [12].

Nach dem Einlesen der CL-Daten müssen diese ins NC-Programm umgewandelt werden. Bei der mehrachsigen Bearbeitung ist die Orientierung der Werkzeugachse durch die Komponenten des Achsenvektors bestimmt. Um diese Komponenten in die Koordinaten der Maschinendrehachsen zu konvertieren, muss eine Aufgabe der inversen Kinematik für die kinematische Kette der Maschine durchgeführt werden. Im Postprozessor können auch verschiedene Kontrollen der NC-Programme implementiert werden. Es können z. B. die Verfahrwege oder Vorschübe in den einzelnen Achsen kontrolliert werden [13, 14, 15].

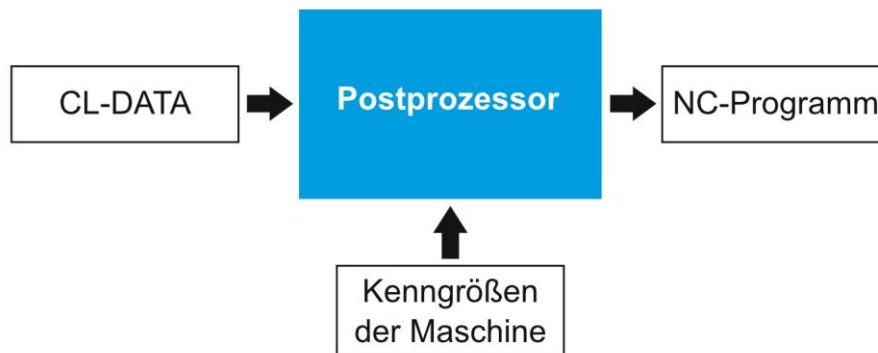


Bild 4 – Schema eines CNC-Postprozessors

Aus der Sicht der Implementierung können die CNC-Postprozessoren in zwei Gruppen geteilt werden. Die erste Gruppe bilden die CNC-Postprozessoren, die in einem automatischen Postprozessorgenerator erzeugt werden. Die Generatoren der CNC-Postprozessoren sind Bestandteil mancher CAM Systeme. Es handelt sich um die einfachste Lösung, wie ein CNC-Postprozessor erzeugt werden kann. Der Anwender wählt in jedem Schritt eine

vordefinierte Lösung. Am Ende des Vorgehens gibt es eine Kombination der Maschinenkinematik, des Steuerungssystems und anderer Parameter. In diesem Fall werden aber nur allgemeine Maschinenkonzeptionen mit klassischen kinematischen Ketten unterstützt. Um eine beliebige Maschinenkonzeption zu modellieren, gibt es die zweite Gruppe der CNC-Postprozessoren und zwar die separaten Anwendungen. Diese Anwendungen können in jeder Programmiersprache entworfen werden. In solchen Postprozessoren können verschiedene Algorithmen implementiert werden, deshalb ist die Funktionalität nicht begrenzt.

Die CNC-Werkzeugschleifmaschinen haben relativ spezifische Eigenschaften, weshalb der Postprozessor in einer Programmiersprache als eine selbstständige Anwendung geschrieben werden muss.

Werkzeugschleifmaschinen

Werkzeugschleifmaschinen wurden vor allem zur Herstellung und zum Nachschärfen der verschiedenen Zerspanwerkzeuge entwickelt. Weil die Geometrie der Zerspanwerkzeuge oft kompliziert ist, sind die Werkzeugschleifmaschinen für die simultane mehrachsige Bearbeitung konzipiert.

Die CNC-Werkzeugschleifmaschinen entwickelten sich historisch aus konventionellen Maschinen. Die Bahnsteuerung in einzelnen Achsen wird mithilfe von Steuerungssystem realisiert. Die Maschinenkonstruktion wurde im Laufe der Zeit den Anforderungen der neuen Steuerungssysteme angepasst. Das Maschinenbett ist oft aus modernen Werkstoffen, wie z. B. Mineralguss oder Polymerbeton, hergestellt. Linearachsen können mit einem direkten Wegmesssystem mit Glasmaßstäben ausgerüstet werden. Dieses System bietet eine sehr gute Messgenauigkeit und auch die Abweichungen, die ihre Ursache in der Wärmeausdehnung haben, lassen sich minimieren. Alle Achsen können mit Direktantrieben mit integrierter Kühlung ausgestattet werden. Die Direktantriebe zeichnen sich durch sehr kurze Reaktionszeiten aus. Die kurzen Reaktionszeiten zusammen mit dem direkten Wegmesssystem haben einen großen Einfluss auf die Qualität der Produktion. Eine Diagnose der Maschine kann auch über das Internet durchgeführt werden. Zur Verbesserung der Produktivität können manche CNC-Werkzeugschleifmaschinen auch mit einem Schleifscheibenwechsler ausgestattet sein. So kann der Zeitverlust beim Schleifscheibenwechsel reduziert werden, da die Schleifsätze mit Düsen für die Kühlschmierstoffzufuhr im Voraus vorbereitet werden können. Für eine Automatisierung der Maschinen, z. B. für den Mehrschichtbetrieb, können diese je nach Maschinentyp auch mit einem Palettenlader ausgerüstet werden. Das

Steuerungssystem der Maschine ist dann in der Lage automatisch die Werkstücke zu wechseln [16, 17].

Die CNC-Werkzeugschleifmaschinen sind auch mit einem Messsystem ausgestattet. Mess- und Steuerungssystem sind miteinander verknüpft und ermöglichen das Vermessen von Rohlingen und Zerspanwerkzeugen. Dieses Messsystem ist oft mithilfe eines Tasters realisiert, einige Maschinenhersteller [17] bieten auch optische Messsysteme mit CCD-Kameras an. Bei der Serienfertigung ermöglicht ein Messsystem auch eine statistische Prozessüberwachung. Damit sind einfache Korrekturen der einzelnen Prozessstellgrößen möglich. Die modernsten Schleifmaschinen sind z. Z. auch mit verschiedenen Systemen zur Überwachung des Schleifprozesses ausgerüstet [18, 19].

Kinematische Ketten der Werkzeugschleifmaschinen

Die kinematische Kette besteht aus einzelnen beweglichen Teilen der Werkzeugmaschine. Zwischen den einzelnen Teilen können kinematische Verbindungen eingefügt werden. Zu diesen Verbindungen gehören vor allem Fixierungen und translatorische oder rotatorische Bewegungselemente. Bei einer Fixierung ist der Freiheitsgrad gleich Null. Translatorische und rotatorische Bewegungselemente besitzen einen Freiheitsgrad von Eins. Es handelt sich dabei um eine gesteuerte Achse.

In der Regel ist die kinematische Kette einer CNC-Werkzeugschleifmaschine in zwei Komponenten geteilt. Der eine Teil dieser Kette trägt das Werkstück und der andere die Schleifscheibe. Aus der Sicht der Bahnprogrammierung ist es möglich zwei Arten von Steuerungssystemen zu unterscheiden. Die Steuerungssysteme können entweder eine offene, flexible programmierbare, oder eine geschlossene Architektur, für bestimmte Schleifaufgaben, haben.

Geschlossene Steuerungssysteme werden für konkrete Geometrien bzw. konkrete Typen von Zerspanwerkzeugen entwickelt. Diese sind in den Maschinen implementiert. Der Vorteil dieser Systeme liegt in ihrer relativ guten Übersichtlichkeit. Die einzelnen Kenngrößen werden oft in Tabellensystemen eingegeben. Diese Systeme sind mit Schleifprogrammen für die Fertigung und für das Nachschleifen des vorgegebenen Zerspanwerkzeugsortiments ausgestattet.

Der größte Nachteil der Systeme mit geschlossener Architektur ist, dass das System keine direkten Änderungen von Datensätzen im NC-Programm zulässt. Es können nur die vom Maschinenhersteller vorgeschlagenen Strategien der Schleifscheibenbewegung und Eingriffsbedingungen genutzt werden. Diese Vorgehensweise hat aber den Vorteil, dass der Maschinenhersteller eine

kollisionsfreie Fertigung gewährleistet. Der Programmierer füllt die vorbereiteten Formulare oder Bildschirmmasken mit Kenngrößen zur gewünschten Geometrie, zur Schleifoperation mit gegebenen Eingriffsbedingungen und mit geometrischen Kenngrößen der Schleifscheiben aus. Die Bahn der Schleifscheibenbewegung selbst kann er nur sehr wenig über die Korrekturwerte des Schleifprozesses beeinflussen.

Bei den Systemen mit offener Architektur hat der Bediener die Möglichkeit des Zugriffs auf die NC-Programme, die oft im ISO/DIN Format vorliegen. Das heißt, Programme können erstellt, editiert, verifiziert usw. werden. Der Bediener hat die Möglichkeit direkt den Fertigungsprozess, z. B. über die Eingriffsbedingungen oder die Zerspanungsstrategie, zu beeinflussen und so eigene Erfahrungen in den Prozess einzubringen. Diese Flexibilität und Unabhängigkeit vom Maschinenhersteller sind ein großer Vorteil. Sie ermöglicht eigene Entwicklungen in bestimmten Bereichen, wie z. B. der Fertigungsstrategie des genauen Nutenprofils in der Wendel eines Werkzeuges mit Hilfe standardisierter Schleifscheiben, oder der Programmierung der Schleifscheibenbewegung entlang gewünschten Kurven. Ein Nachteil ist in diesem Fall das geforderte höhere Niveau des Bedieners, der die NC-Programme vorbereitet und die Maschine bedient.

Fünf und mehr gesteuerte Achsen können auf unterschiedliche Art und Weise angeordnet werden. Die kinematische Kette kann daher vom Maschinenhersteller relativ beliebig gewählt werden. Es ist nur zu beachten, dass der Aufbau der kinematischen Kette die Eigenschaften der Maschine beeinflusst. Es handelt sich vor allem um Steifigkeit, Genauigkeit, Wärmestabilität und Arbeitsbereiche in den einzelnen Achsen. In Bild 5 ist ein Beispiel einer kinematischen Konzeption einer CNC-Werkzeug-schleifmaschine Walter Helitronic dargestellt. Die Anlage hat fünf numerisch gesteuerte Achsen, die eine beliebige Ausrichtung der Schleifscheibe erreichen können. Die translatorische Achse X ist mit dem Tisch und dem Werkstückspansystem verknüpft. Die Y- und Z-Achse sind mit dem Spindelstock verbunden. Die primäre Rotationsachse C dreht den kompletten Tisch, die sekundäre Rotationsachse A dreht das Werkstück in der Spannvorrichtung wie in Bild 5 beschrieben.

Im Arbeitsraum der Schleifmaschine sind mehrere Koordinatensysteme abgebildet. Das feste System O_F ist mit der Maschine verbunden und wird als Nullpunkt für die NC-Programmierung verwendet. Ein weiterer wichtiger Punkt O_T ist der Flansch der Spindel, welcher den programmierten Punkt der Schleifscheibe referenziert. An der Vorderseite des Werkstücks befindet sich der Nullpunkt O_W des zu bearbeitenden Teils. Alle Koordinaten in der Datei mit CL Daten sind zu

diesem Koordinatensystem referenziert. Für die Ableitung der Form-Shaping-Funktion können mehrere Methoden angewendet werden, jedoch ist die Multiplikation der Transformationsmatritzen eines der effizientesten Verfahren.

Die kinematische Kette besteht aus zwei Teilen, ein Teil ist mit dem Drehtisch, der zweite ist mit dem Spindelstock verbunden. Das Koordinatensystem O_C beschreibt die Verschiebung entlang der X-Achse am Drehtisch. Die Drehung des Tisches über den Winkel γ um die X-Achse ist durch das Koordinatensystem O'_C beschrieben. Auf dem Nullpunkt des Werkstücks, der auf der Spannvorrichtung ist, liegt das System O_A . Die Drehung des Werkstücks in der Spannvorrichtung wird über den Winkel α um die X-Achse im System O'_A beschrieben. Das Koordinatensystem O_S befindet sich im Nullpunkt der Spindel.

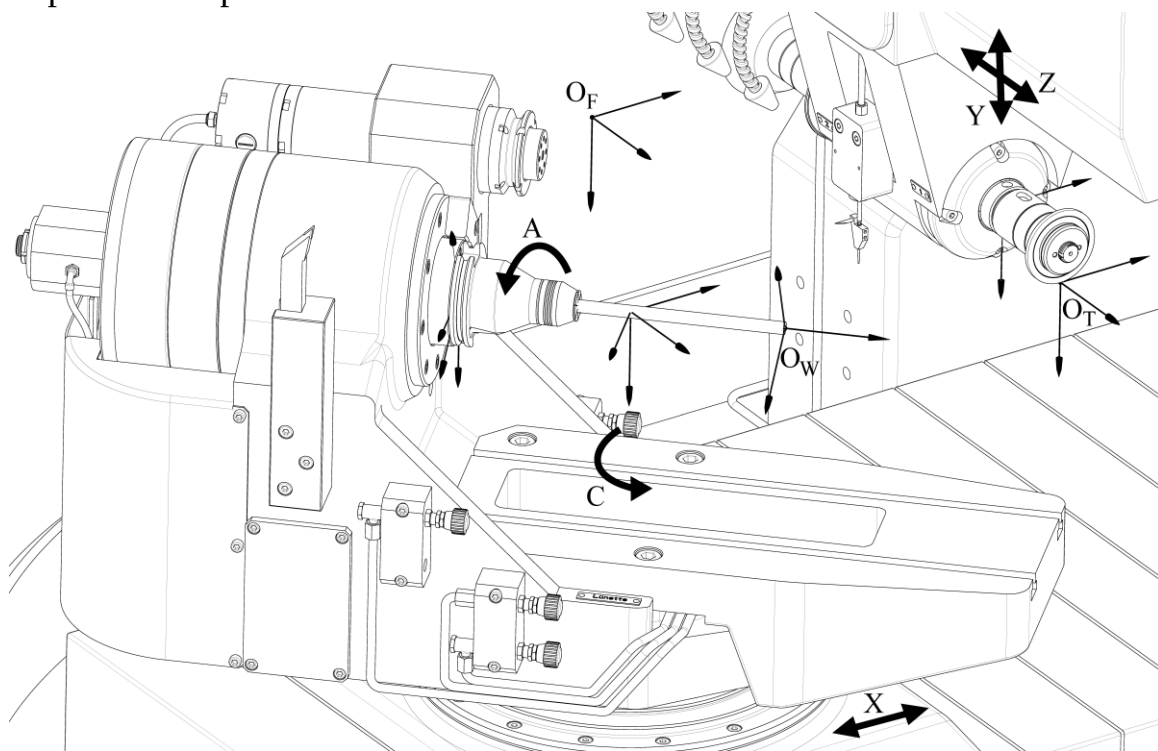


Bild 5 – Nullpunkte und gesteuerte Achsen im Arbeitsbereich der Schleifmaschine

Die Bemaßung der Maschine kann mithilfe von Vektoren, die zwischen festgelegten Koordinatensystemen definiert sind, vorgenommen werden. Diese Vektoren bestehen aus drei Typen von Komponenten, der erste Typ sind die fixen Parameter, z. B. v_{FSx} , v_{FCy} , v_{FCz} , v_{CAx} , welche durch die Dimensionen der Maschine gegeben sind. Den zweiten Typen stellen die Parameter des Werkstücks $v_{A'Wx}$ und des Adapters für die Schleifscheibe v_{STz} dar. Die dritte Gruppe ist definiert durch die Parameter der gesteuerten Achsen v_{FCx} , v_{FSy} und v_{FSz} , wie in Bild 6 gezeigt wird.

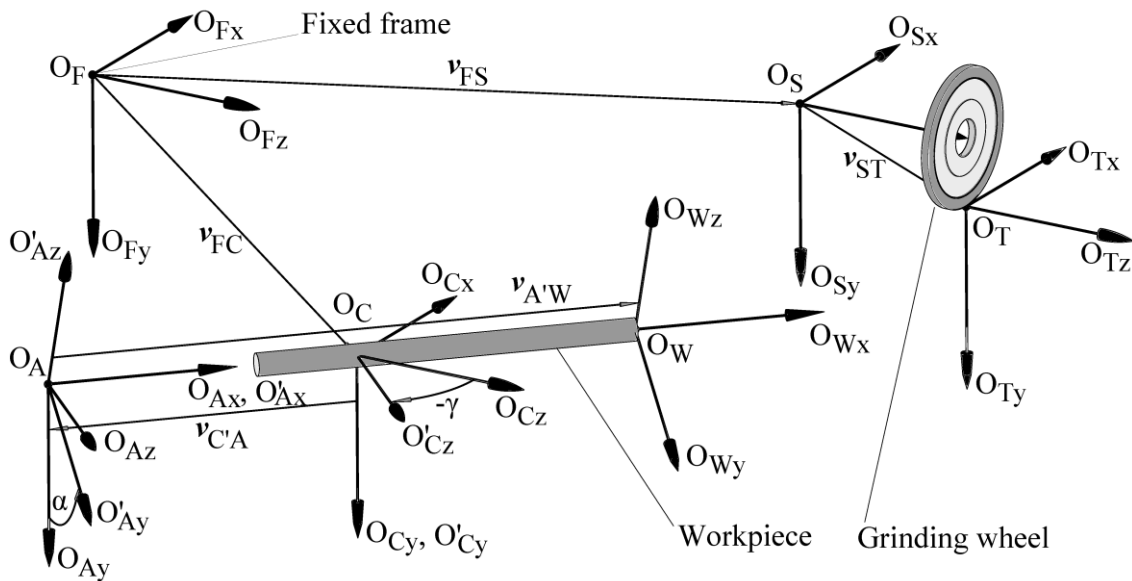


Bild 6 – Koordinatensysteme und Parameter

Für die Koordinatentransformation des Achsenvektors a_w der Schleifscheibe und des Programmierpunktes r_w des Werkstück-Koordinatensystems O_w zum Koordinatensystem O_T der Schleifscheibe kann die Gleichung (6) verwendet werden:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{a}_T & \mathbf{r}_T \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = {}^{w \rightarrow T} \mathbf{M} \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{a}_w & \mathbf{r}_w \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \mathbf{T}_{A'W} \cdot \mathbf{R}_{A'A} \cdot \mathbf{T}_{C'A} \cdot \mathbf{R}_{C'C} \cdot \mathbf{T}_{FC} \cdot \mathbf{T}_{FS} \quad (6)$$

Die Matrix für die Koordinatentransformation aus dem Werkzeug-Koordinatensystem zum Werkstück-Koordinatensystem erhält man aus der inversen Matrix, wie in der Gleichung (7) dargestellt wird:

$${}^{T \rightarrow W} M = {}^{W \rightarrow T} M^{-1} \quad (7)$$

Inverse Kinematik

Die Werkzeugbahnen für den Herstellprozess sind in den üblichen CAD/CAM-Systemen gestaltet. Die Bahnen der Schleifscheibe sind in der CL-Daten-Datei gespeichert, in der alle Koordinaten zum Bezugssystem des Werkstücks O_w beschrieben sind. Die CL-Daten stellen die Koordinaten des programmierten Punktes und die Richtungskosinus des Achsenvektors dar. Die CL-Daten sind eine neutrale Beschreibung für die Speicherung von Informationen über die Werkzeugbahnen, welche in NC-Programme für verschiedene Maschinen mithilfe eines Postprozessors umgewandelt werden können. In der Praxis wird die Umwandlung in zwei Schritten durchgeführt. Im ersten Schritt werden die Koordinaten der Drehachsen von den

Richtungskosinus aus berechnet. Im zweiten Schritt werden die verbleibenden translatorischen Achsen im Bezug auf die vorher berechneten Winkel bestimmt.

Die Drehwinkel werden wie folgt berechnet. Zuerst wird der Winkel α bestimmt, dann wird das Werkstück um diesen Winkel α um die X-Achse gedreht und daraus wird zuletzt der Winkel γ berechnet. Die Gleichungen zur Bestimmung der Winkel α und γ sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Nach der Berechnung des Winkels α ist es notwendig, den Achsenvektor des Werkzeuges a_w wie folgt zu transformieren:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{a}_{w \rightarrow \alpha} \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{a}_w \\ 0 \end{pmatrix} \cdot \mathbf{R}_{x,\alpha} \quad (8),$$

wo $\mathbf{R}_{x,\alpha}$ - eine Rotationsmatrix um die X-Achse um den Winkel α darstellt.

Während der Verarbeitung von Werkzeugbahnen kann eine besondere Situation, die unter dem Begriff Singularität bekannt ist, auftreten (dritte Zeile in Tabelle 1). Diese Situation passiert, wenn der Achsenvektor der Schleifscheibe parallel zur Spindelachse positioniert ist. In dieser Situation kann der Wert des Winkels α nicht bestimmt werden. Alle Werte von Winkel α erfüllen die Bedingung der Parallelität mit der Spindelachse. Für diese Situation kann keine exakte Lösung gefunden werden, eine der in [15] beschriebenen Methoden verformt leicht die Werkzeugbahnen in der Nähe von singulärer Konfiguration.

Tabelle 1 – Lösungen für die Winkel α und γ

Richtungskosinus		Gleichung	Richtungskosinus		Gleichung
j	k		i	$k_{\rightarrow \alpha}$	
0	<0	$\alpha = 0$	0	<0	$\gamma = 0$
0	>0	$\alpha = \pi$	0	>0	$\gamma = \pi$
0	0	<i>Existiert nicht</i>	0	0	<i>Ausgeschlossen, $j=0$</i>
<0	$\langle -1,1 \rangle$	$\alpha = \arctan\left(\frac{k}{j}\right) + \frac{3\pi}{2}$	<0	$\langle -1,1 \rangle$	$\gamma = \arctan\left(\frac{k_{\rightarrow \alpha}}{j}\right) - \frac{\pi}{2}$
>0	$\langle -1,1 \rangle$	$\alpha = \arctan\left(\frac{k}{j}\right) + \frac{\pi}{2}$	>0	$\langle -1,1 \rangle$	$\gamma = \arctan\left(\frac{k_{\rightarrow \alpha}}{j}\right) + \frac{\pi}{2}$

Für die Berechnung der Bewegungen in den translatorischen Achsen muss der Tisch unter Berücksichtigung von den berechneten Winkeln α und γ gedreht werden. Dann können zwei Vektoren definiert werden: der Erste aus dem Ursprung des festen Bezugssystems O_F zum kontrollierten Punkt an der Schleifscheibe O_T . Der Zweite aus dem Ursprung des festen Bezugssystems O_F zum programmierten Punkt an der Schleifscheibe. Das Ziel ist eine Koinzidenz zwischen dem Punkt auf der Werkzeugbahn und dem programmierten Punkt an

der Schleifscheibe. Die gewünschten Bewegungen in den translatorischen Achsen können aus der Differenz zwischen den beiden Vektoren berechnet werden.

Prüfung des Algorithmus

Die entwickelten Algorithmen wurden in eine JAVA Anwendung implementiert, die eine einfache grafische Schnittstelle für die vom Benutzer eingegebenen Parametern der Maschine und der Werkstückparameter bietet. Die entwickelte Anwendung liest die Textdatei mit CL-Daten. Aus den gelesenen Werkzeugbahnen können die Koordinaten der kontrollierten Achsen Zeile für Zeile berechnet werden. Schließlich werden die berechneten Koordinaten formatiert und in eine Textdatei mit NC-Programm gespeichert. Die Darstellung der Benutzeroberfläche des Postprozessors ist im Bild 7 zu sehen.

Für die experimentelle Überprüfung wurden die CL-Daten für die Herstellung von zwei Werkzeugen ausgearbeitet. Als erstes Werkzeug wurde ein Wendelbohrer mit drei Nuten und einem Durchmesser von 12 mm ausgesucht. Das Schleifen wurde in den drei folgenden Operationen durchgeführt: Nutenschleifen, Schleifen der Fasen und Stirngeometrieschleifen. Nutenschleifen und Schleifen von Fasen sind die Operationen mit der simultanen Bewegung von drei Achsen (X, A, Z), die vierte und fünfte Achse (C, Y) sind dabei indiziert. Das Schleifen der Bohrspitze, vor allem das Schleifen der großen Flanken, die als Teil der konischen Fläche definiert sind, verlangt die simultane Fünf-Achs-Bearbeitung. Als Werkstückmaterial wurde Vollhartmetall vom Typ K20-F ausgewählt, der ein typisches Material für die Herstellung von Schneidwerkzeugen für eine allgemeine Anwendung darstellt.

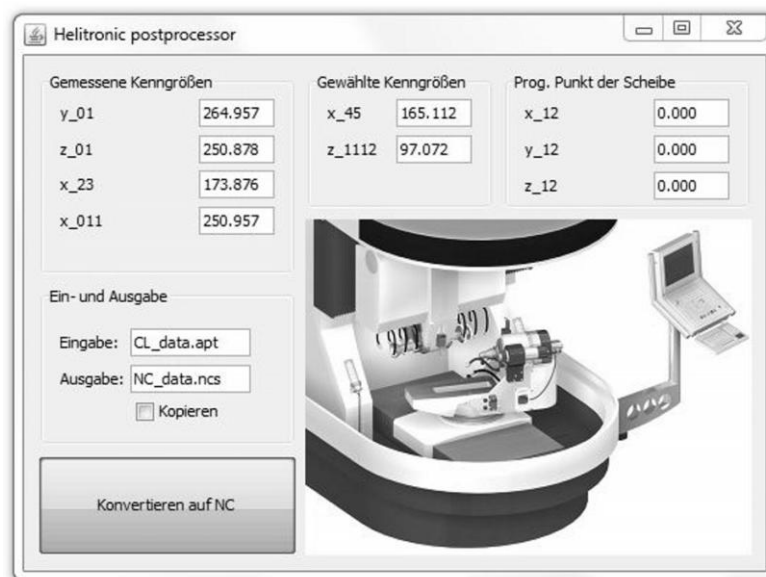


Bild 7 – Speicherauszug der Benutzeroberfläche des Postprozessors

Das zweite Werkzeug war ein zylindrischer Fräser mit einem Durchmesser von 2 mm. Das Schleifen dieses Schaftfräser wurde in vier Operationen realisiert: Nuten, Fasen, Stirnlücken und Freiflächen auf der Stirnseite. Das Schleifen von Nuten und Fasen kann wie beim Bohrer durch Drei-Achs-Bearbeitung (X, A, Z) realisiert werden. Das Schleifen von Stirnlücken und Freiflächen auf der Stirnseite des zylindrischen Fräfers kann ebenfalls mit Drei-Achs-Bearbeitung erfolgen. Für den Schaftfräser wurde Vollhartmetall vom Typ K40-UF ausgewählt. Diese Qualität ist wegen der sehr feinen Körnung für die Herstellung von kleinen Werkzeugen geeignet. Das Schleifen wurde auf der Walter Helitronic Diamond Werkzeugschleifmaschine unter Anwendung des Ölheld Ionogrind-Kühlmittels realisiert. Die hergestellten Schneidwerkzeuge sind in Bild 8 dargestellt.

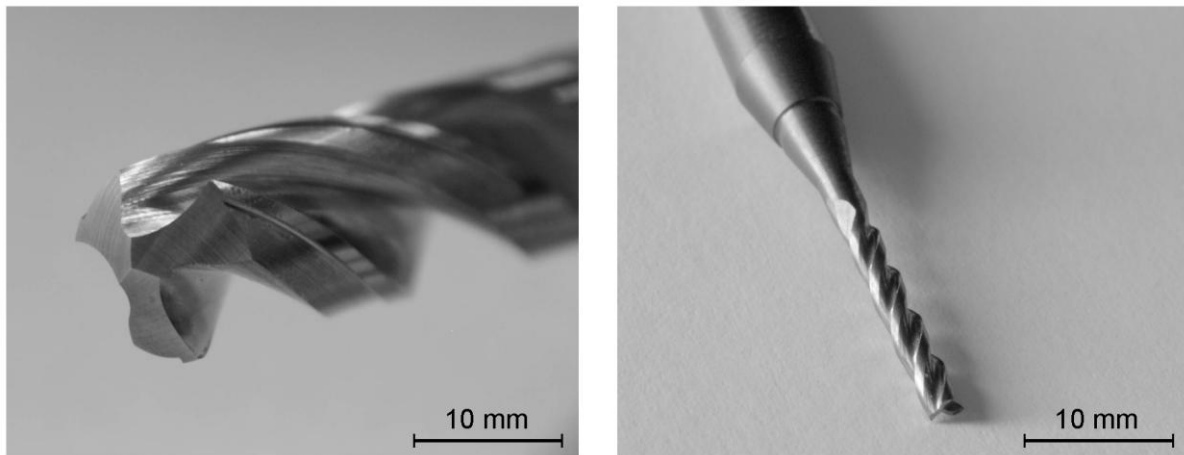


Bild 8 – Herstellung von Schneidwerkzeugen;
Wendelbohrer mit drei Schneiden (links), Schaftfräser (rechts)

Zusammenfassung

In diesem Artikel wurde ein Postprozessor dargestellt, der für eine 5-Achs-Werkzeugschleifmaschine Walter Helitronic entwickelt wurde. Für die Ableitung der Form-Shaping-Funktion wurde die Multiplikation der transformierten Matrizen verwendet. Für das entwickelte kinematische Modell der Schleifmaschine wurde die inverse Kinematik für Rotations- und Translationsachsen als Lösung gefunden. Die Algorithmen wurden in Java implementiert und für experimentelle Verifikationen während der Herstellung von zwei verschiedenen Arten von Schneidwerkzeugen verwendet.

Literatur: 1. Spur, G., Krause, F.-L., Sidaraus, L.: Development of APT and EXAPT, in Rembold, U. und Dillmann, R. (Hrsg.) Methods and Tools for Computer Integrated Manufacturing, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York Tokyo, 1984, ISBN 3-540-12926-X 2. Lossack, R.-S.: Wissenschaftstheoretische Grundlagen für die rechnerunterstützte Konstruktion, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006, ISBN 978-3-540-29947-9 3. Brill, M.: Parametrische Konstruktion mit CATIA V5, Hanser Verlag, 2006, ISBN 978-3-446-40705-3 4. Krieg, U.: Konstruieren mit Unigraphics NX 6, Hanser Verlag, 2006, ISBN 978-3-446-41562-1 5. Vajna, S., Weber, Ch., Bley, H., Zeman, K., Hehenberger, P.: CA-x-Systeme – warum und wozu?, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009 6. Wyvill, G., Kunii, T. L.: A functional model for constructive solid geometry, The Visual Computer, Vol. 1, No. 1, 1985, S. 3-14 7. Lum, S. K., Tan, S. T., Sze, W. S.: Trimming of free-form objects for a B-Rep solid modeller, Engineering with Computers, Vol. 11, No. 4, 1995, S. 185-198 8. Farin, G.: From Conics to NURBS: A Tutorial and Survey, IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 12, No. 5, 1992, S. 78-86 9. Ma, W., Kruth, J.-P.: NURBS curve and surface fitting for reverse engineering, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 14, No. 12, 1998, S. 918-927 10. Pieggl, L., Tiller, W.: The NURBS Book, Springer Berlin, 1997 11. CAM Software PSI+, StarragHeckert Technology AG, Rorschacherberg, Schweiz, 2005 12. Kief, H. B., Roschiwal, H. A.: NC/CNC Handbuch 2007/2008, Hanser Verlag, 2007, ISBN 978-3-446-40943-9 13. Lee, R.-S., She, C.-H.: Developing a postprocessor for three types of five-axis machine tools, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 13, No. 9, 1997, S. 658-665 14. She, C.-H., Huang, Z.-T.: Postprocessor development of a five-axis machine tool with nutating head and table configuration, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 38, No. 7, 2008, S. 728-740 15. Sørb, K.: Inverse kinematics of five-axis machines near singular configurations, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 47, 2007, S. 299-307 16. Helitronic Programm: CNC-Schleif- und Erodiermaschinen, WALTER Maschinenbau GmbH, Tübingen, 09/2005 17. ANCA Total Precision: The ANCA technology difference, ANCA Pty. Ltd., Bayswater Nord, Victoria, Australia, 2006 18. Karpuschewski, B., Wehmeier, M., Inasaki, I.: Grinding monitoring system based on power and acoustic emission sensors, Annals of the CIRP 49, Vol. 1, 2000, S. 235-240 19. Karpuschewski, B., Inasaki, I.: Monitoring systems for grinding processes, Condition Monitoring and Control for Intelligent Manufacturing, Edited by L. Wang & R. X. Gao, Springer-Verlag London, 2006, S. 83 – 107.

В.Д. КОВАЛЬОВ, д-р техн. наук,

Я.В. ВАСИЛЬЧЕНКО, канд. техн. наук, Краматорськ, Україна

ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ МЕХАНІЧНОГО ОБРОБЛЕННЯ ВИРОБІВ ВАЖКОГО МАШИНОБУДУВАННЯ З ВРАХУВАННЯМ ФАКТИЧНОГО СТАНУ ПРОЦЕСУ В РЕЖИМІ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ

Розроблена система адаптивного управління роботою важкого токарного верстата зі створенням законів оптимального управління технологічною системою.

Разработана система адаптивного управления работой тяжелого токарного станка с созданием законов оптимального управления технологической системой.

The adaptive control system by of a heavy lathe work with creation of optimum control laws of technological system is developed.

Вступ. Виробництво важкого металургійного, енергетичного, транспортного обладнання є основою машинобудування України та важливою складовою частиною її експорту. Можливість виготовлення важких машин, конкурентоспроможних на світовому ринку, забезпечується оснащенням машинобудівних підприємств сучасним верстатним обладнанням. З розвитком промисловості посилюються вимоги до машин, підвищується точність їх виготовлення, застосовуються нові марки матеріалів, які дають можливість досягнення нового рівня експлуатаційних характеристик. Технологічні процеси автоматизованих виробництв повинні бути забезпечені обладнанням високого класу точності з високою стабільністю характеристик функціонування.

Технологічне обладнання с позиції теорії управління є багатоконтурною системою з нелінійними елементами та нестационарними властивостями. В процесі експлуатації обладнання змінюється його динамічний стан не тільки при переході від однієї операції до іншої, але й при типових операціях технологічного процесу. Априорно врахувати всі зміни практично неможливо. Таким чином, при призначенні оптимальних режимів різання необхідно враховувати безліч факторів, які пов'язані з фактичним станом заготовки, інструменту та всієї технологічної системи в цілому. Цим і визначається актуальність оптимізації режимів механічної обробки виробів важкого машинобудування з врахуванням фактичного стану процесу в режимі реального часу. Критерії, принципи та приклади оптимізації наведені в роботах [1-4], які вирішують задачу управління.

В ДДМА вже декілька десятиріч проводяться роботи, спрямовані на підвищення якості і працездатності верстатного обладнання та різального інструменту, адаптивних систем керування для важких верстатів, розробку інтегрованих технологій зміцнення інструменту і деталей машин [4-8]. Але питання, що зазначені у завданнях досліджень, потребують нових комплексних досліджень і розробок в напрямку створення інтегральних систем адаптивного управління процесом різання на важких верстатах з урахуванням стану інструменту.

Важкі верстати нового покоління мають всі технічні можливості для регулювання параметрів обробки безпосередньо під час різання в режимі реального часу. Сучасні системи ЧПК дозволяють використовувати пре- та постпроцесори, а також інформацію від вимірювальних пристроїв, які фіксують параметри процесу обробки (температуру, зусилля, крутні моменти, вібрації та ін.). За допомогою цих засобів в процесі обробки динамічно коректується початкова програма ЧПК з режимними параметрами та геометрією інструменту. Окрім цього, є можливість здійснення управління з системою самонавчання, зі змінною структурою управління, багатомірними зворотними зв'язками. Для здійснення управляючого впливу використовуються і розробляються нові мехатронні системи [9].

Розробка законів управління технологічною системою на базі важкого верстата. Специфічні особливості важкого машинобудування не дозволяють механічно переносити прогресивні методи технології й організації, які використовуються в багатосерійному і масовому виробництвах, на підприємства, що роблять різні види унікальних машин.

Процес обробки деталей одночасно розглядався як фізичний, кінематичний та організаційно-виробничий. В цьому процесі беруть участь такі елементи: заготовка, що є об'єктом обробки; різальний інструмент, що впливає на заготовку; верстат, що забезпечує установку й закріплення заготовки й різального інструменту; необхідні основні й допоміжні робочі рухи і т.д.

Параметри, що характеризують описані вище елементи процесу механічної обробки деталей, будучи характеристиками умов обробки, являють собою вхідну інформацію при регулюванні процесу обробки.

Встановлено, що протікання процесу механічної обробки на важких верстатах у часі в реальних умовах обумовлено дією безлічі факторів, що впливають на хід процесу й мають найчастіше випадковий характер зі значним розсіюванням параметрів [10]. Так детермінувати процес, щоб всі фактори, що визначають його протікання в будь-який момент часу, були враховані заздалегідь, неможливо. Можна, звичайно, використовувати стохастичні прийоми програмування, але якщо вони засновані на

статистичних методах, то не виключене виникнення невизначених ситуацій і завжди можливий ризик, що процес відхилиться від заздалегідь запропонованої програми. Урахувати виниклі ситуації в процесі різання на важких верстатах, щоб його протікання відповідало поставленим завданням, можливо оперативним втручанням у процес щораз із появою відхилення або при тенденції до відхилення.

Закони управління технологічною системою в процесі обробки формуються так, щоб на основі первинних параметрів, які характеризують обраний тип заготовки (матеріал, розмір, припуск и т.д.) та прийнятий метод обробки (верстат, пристосування, схема різання, технологічне середовище), змінюючи параметри керування (режими різання, варіант й геометричні параметри інструменту, параметри й структуру несучої системи верстату), впливати на параметри регулювання (механіка процесу різання, наростоутворення, стружкоутворення, теплові явища, сила та міцність різання, вібрації) та одержати необхідні технологічні параметри (точність, якість, стійкість міцність та інструменту, продуктивність, економічність, форма стружки) (рис. 1).



З метою вирішення проблеми забезпечення високопродуктивної та високоточної автоматизованої обробки деталей важкого машинобудування, в тому числі з нових марок важкооброблюваних матеріалів, розроблено інтегральний комплекс оптимального управління технологічною системою, який включає важкий верстат, системи інструментів і інструментозабезпечення, систему адаптивного керування з комплектами вимірювальних і діагностичних засобів, математичні моделі функціонування технологічної системи.

Алгоритми роботи оптимальної системи адаптивного керування формуються із включенням критеріїв: собівартість обробки, продуктивність, точність, надійність системи та ін. Структура адаптивної технологічної системи має високий ступінь обхвату зворотними зв'язками: по відносному положенню й траєкторіям формотворних рухів елементів системи; їх фізичному стану й обурюючим факторам. Якість роботи адаптивної технологічної системи оцінюється на підставі процесно-орієнтованого підходу за допомогою теорії кваліметрії як якість складної ієрархічної системи, що дозволяє кількісно оцінити ефективність різних варіантів схем, визначити вагомі фактори й інформативні канали діагностування. Адаптивне керування процесом різання будується на базі багаторівневої системи прийняття рішень із елементами штучного інтелекту.

Серед факторів, які ускладнюють реалізацію алгоритму адаптивного керування процесом різання слід виділити те, що на момент призначення раціональних режимів обробки відсутня повна інформація про параметри процесу різання. Така невизначеність, іноді дуже значна, носить принциповий характер та не може бути усунена до появи інформаційних сигналів в процесі різання.

У детермінованій постановці задачі така ситуація може бути описана так. Якщо X – множина технологічно допустимих варіантів плану, $F(x)$ – вектор продуктивності при реалізації плану $x \in X$, а $G(x)$ – затрати. Вектор – функції $F: X \rightarrow R^k$ та $G: X \rightarrow R^l$ вважаються заданими. Якщо $F_0 \in R^k$ – планове завдання, то вибір плану виконується з допустимої множини $X(F_0) = \{x \in X | F(x) \geq F_0\}$ у відповідності з заданим критерієм $G(x)$ (при $l > 1$ – векторним).

Якщо планування здійснюється в умовах невизначеності, то конкретний вигляд функцій F та G залежить від невідомого раніше

комплексу умов, які складаються в процесі обробки. Обмежившись для спрощення дискретним випадком, допустимо, що комплекс цих умов може сформуватися в одному з N варіантів (станів процесу), при чому i -му варіанту відповідають функції продуктивності і затрат $F_i: X \rightarrow R^k$ та $G_i: X \rightarrow R^l$ ($i=1 \dots N$). Якщо ставити вимогу безумовного виконання завдання F_0 , то допустима множина приймає вигляд:

$$X(F_0) = \{ x \in X \mid F_i(x) \geq F_0, i=1 \dots N \}, \quad (1)$$

а критерій $G_i(x)$ на цей раз залежить від стану процесу. Однак, такі жорсткі принципи формування допустимої множини різко звужують сукупність допустимих планів та фактично орієнтуються на найменш сприятливі умови реалізації процесу обробки. Процесу механічної обробки більш адекватна модель двох етапів, яка передбачає можливість адаптивного регулювання. Регулювання здійснюється після того, як стан процесу став відомим, та виявилось, що реалізація прийнятого плану $x \in X$ не забезпечує виконання завдання F_0 .

Можливості коректування плану, які вважаються незалежними від стану процесу, характеризуються допустимою множиною заходів корекції Y та функціями $\varphi: Y \rightarrow R^k$ та $\gamma: Y \rightarrow R^k$, де $\varphi(y)$ та $\gamma(y)$ - додаткові продуктивність та затрати при здійсненні заходів корекції $y \in Y$.

При розробці системи адаптивного управління наряду з планом $x \in X$ проектується ряд заходів корекції $y_1 \dots y_N$. Розширений план $u = (x, y_1 \dots y_N)$ вибирається з множини:

$$U = U(F_0) = \{ (x, y_1 \dots y_N) \mid x \in X, y_i \in Y, F_i(x) + \varphi(y_i) \geq F_0, i=1 \dots N \}, \quad (2)$$

та оцінюється при реалізації i -го стану процесу вектором:

$$V_i(u) = (V_{i1}(u), \dots, V_{il}(u)) \equiv G_i(x) + \gamma(y_i), i=1 \dots N, \quad (3)$$

Якщо інформація про імовірність реалізації стану процесу обробки відсутня, то при виборі розширеного плану $u \in U$ слід прямувати до скорочення затрат $V_i(u)$ у кожному з потенційно можливих станів $i=1 \dots N$. У виниклій таким чином двічі багатокритеріальній (внаслідок можливої багатопараметричності затрат, а також наявності $N > 1$ станів процесу) задачі (U, V) векторний критерій $V = (V_1, \dots, V_N): U \rightarrow R^{lN}$, який задано на множині, виділяє з останнього сукупність V – ефективних планів:

$$\varepsilon(U, V) \equiv \{ u \in U \mid V(v) \leq V(u), v \in U \} \Rightarrow V(v) = V(u) \} \quad (4)$$

Серед компонент векторного критерія, який використовують для вибору рішень з множини U необхідно враховувати також надійнісні характеристики. Якщо $z=(z_1, \dots, z_l)$ – рівень затрат, який планується на стадії розробки розширеного плану $u=(x, y_1, \dots, y_N)$; вектор z приєднається в якості додаткової змінної задачі до плану u . Рівень затрат z задовольняє обмеження $z \geq z^*$, де $z^* > 0$.

Надійність $R_j(u, z)$ плану (u, z) по j -й компоненті затрат характеризуємо середнім перевищенням фактичних затрат над запланованим рівнем:

$$R_j(u, z) = \sum_{i=1}^N p_i [V_{ij}(U) - z_j], j=1, \dots, l, \quad (5)$$

Разом із характеристикою $R_j(u, z)$ представляє інтерес відносна характеристика надійності:

$$r_j(u, z) = R_j(u, z), j=1, \dots, l, \quad (6)$$

Приєднання до вектору z вектор-функції $R_j(u, z) = (R_1(u, z), \dots, R_l(u, z))$ або $r_j(u, z) = (r_1(u, z), \dots, r_l(u, z))$ дозволяє сформулювати два варіанти багатокритеріальної моделі.

У першому варіанті на множині $U = \{u, z \mid u \in U, z \geq z^*\}$ задан $2l$ -мірний векторний критерій $\Phi_I(u, z) = (z, R(u, z))$. У другому варіанті на тій же множині векторний критерій має вигляд: $\Phi_{II}(u, z) = (z, r(u, z))$. У кожній з задач всі компоненти векторного критерія підлягають мінімізації.

Задача 1 обмежує область плануємого рівня затрат z та відповідного розширеного плану u сукупністю ефективних рішень:

$$\varepsilon(U, \Phi_I) = \{u, z \in U \mid ((u', z') \in U, \Phi_I(u', z') \leq \Phi_I(u, z)) \Rightarrow \Phi_I(u', z') \leq \Phi_I(u, z)\}, \quad (7)$$

Аналогічним чином задача 2 виділяє ефективну множину $\varepsilon(U, \Phi_{II})$.

$$\Phi_{II}(u', z') \leq \Phi_{II}(u, z) \Rightarrow \Phi_I(u', z') \leq \Phi_I(u, z); (u, z), (u', z') \in U, \quad (8)$$

Ці задачі можуть бути використані для побудування межі Парето. Результатом параметричного аналізу є крива компромісу між двома цілями. Такий підхід може бути використаний також при наявності чотирьох та більше критеріїв. Достатньо виділити яку-небудь пару з них та зафіксувати значення інших на визначених рівнях.

Висновки. Така методика реалізована у дослідному зразку адаптивної системи керування для важкого токарного верстата та інтегральному комплексі оптимального управління адаптивною технологічною системою. Результати роботи використані для розробки сучасних важких верстатів нового покоління, аналогів яких ще не існує. Розроблені верстати повністю конкурентоспроможні на світовому рівні.

Подальший розвиток законів управління технологічною системою важкого верстату повинен іти в напрямку розробки багаторівневої системи «штучного інтелекту» на базі системи адаптивного керування з перемінною структурою.

Перелік посилань: 1. *B. Arezoo, K. Ridgway, etc.* Selection of cutting tools and conditions of machining operations using an expert system // *Comput. Ind.* 42 (2000), p. 43–58. 2. *Y. Shin, Y. Joo* Optimization of machining conditions with practical constraints, *Int. J. Prod. Res.* 30 (1992), p. 2907–2919. 3. *I. Yellowey, E. Gunn* The optimal subdivision of cut in multipass machining operations, *Int. J. Prod. Res.* 27 (1989), p.1573–1579. 4. *B. Gopalakrishan, F. Al-Khayyal* Machine parameter selection for turning with constraints: an analytical approach based on geometric programming // *Int. J. Prod. Res.* 29 (1991), p.1897–1908. 5. *Ковалев В.Д., Мельник М.С.* Система адаптивного управления точностью с улучшенной динамикой для тяжелых станков./ *Вестник ЖДТУ «Процессы механической обработки, станки и инструменты»*, Житомир, 2003.- Т.1.- С.69-76. 6. *Ковалев В.Д.* Основы теории расчета и проектирования гидравлических опорных узлов станочного оборудования // *Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку* - Краматорськ: ДДМА, 2004.- С. 9. 7. *Ковалев В.Д., Васильченко Я.В. и др.* Применение ОИМП для упрочнения деталей машин и режущего инструмента / *Вісник двигунобудування*, 2004.- №4. – С.149-152. 8. *Клименко Г.П., МIRONENKO Е.В., Васильченко Я.В.* Оптимизация процесса обработки деталей сборными резцами с учетом стружкодробления // *Современные технологии, экономика и экология в промышленности, на транспорте и в сельском хозяйстве*. - Киев: ИСМО.- Алушта.- 1998.- С.169-171. 9. *Zatarain, M., Ruiz de Argandona, etc.* New Control Techniques on State Space Observers for Improving the Precision and Dynamic Behaviour of Machine Tools, *Annals of the CIRP*, 54/1, p.393-396. 10. *Васильченко Я.В., Ковалев В.Д.* Управление процессом обработки на тяжелых станках с помощью алгоритма оптимального регулирования/ *Надежность режущего инструмента и оптимизация технологических систем*. - Вып. 19.-Краматорск, 2006.- с.24-33.

П.П. МЕЛЬНИЧУК, д-р техн. наук, **В.Ю. ЛОЄВ**, канд. техн. наук,
О.М. КРАВЧУК, Житомир, Україна

СПОСІБ ОБРОБКИ РІЗАННЯМ НЕЖОРСТКИХ ДЕТАЛЕЙ

Робота присвячена пошукам нових способів обробки нежорстких деталей з видаленням різанням певного шару матеріалу. Розроблений спосіб передбачається застосовувати як для деталей типу тіл обертання (точіння), так і для площинних деталей (фрезерування). Автори запрошують зацікавлених фахівців до обговорення цього напрямку обробки нежорстких деталей, свідомо розуміючи певні можливі погіршення умов різання і, в першу чергу, підвищення зношування інструменту.

Работа посвящена поискам новых способов обработки нежестких деталей с удалением резанием определенного пласта материала. Разработанный способ предполагается применять как для деталей типа тел обращения (точение), так и для плоскостных деталей (фрезерование). Авторы приглашают заинтересованных специалистов к обсуждению этого направления обработки нежестких деталей, сознательно понимая определенные возможные ухудшения условий резания и, в первую очередь, повышение изнашивания инструмента.

The article is devoted to finding new ways of working of non-rigid parts by the removal of a layer of material. The developed method is intended to be used both for parts such as shafts (turning) and for plane parts (milling). The authors invite all interested professionals to discuss this direction of working of non-rigid parts, although we are aware of the possibility of deterioration of the cutting conditions and especially the increase of the tool wear.

Вступ. Однією з актуальних проблем технології машинобудування є обробка нежорстких деталей, кількість яких має тенденцію до суттєвого збільшення в зв'язку з нагальною економічною потребою у зниженні металоємності механізмів і машин. Значна кількість деталей, розрахованих і спроектованих конструкторами, при їх розгляді на технологічність з точки зору існуючих способів обробки, вимагає збільшення їх металоємності (збільшення діаметрів валів, збільшення товщин і введення ребер жорсткості площинних деталей).

Як відмічалось в роботі [1], більша кількість науково-дослідницьких робіт присвячена обробці деталей типу валів, а також інструментів (довгі свердла, зенкери, розгортки, борштанги тощо).

В переважній більшості випадків для обробки таких деталей застосовують люнети, хоча вони ліквідують лише статичні деформації, які в 1,2...1,7 разів менші динамічних [2]. Крім того, налагодження люнетів

займає значний час, суттєво зменшуючи продуктивність обробки. В той же час більшість валів мають ступінчасту форму і взагалі не можуть оброблюватись з використанням рухомих люнетів.

Другим, хоча менш застосованим способом обробки, є спосіб підвищення жорсткості заготовок за рахунок цілеспрямованої зміни пружньодеформованого стану при прикладанні розтягуючого зусилля.

Цей спосіб найбільш ефективний при обробці заготовок діаметрами від 2 до 6 мм і довжиною 100...300 мм, зменшуючи пружний прогин на 80...20%. Розтягуюче зусилля при цьому знаходиться в межах 980...1960 Н [3].

При $d = 8...12$ мм прогин зменшується всього на 5...12%, а при збільшенні діаметра більш ніж 16 мм практично не впливає на статичну жорсткість і прогин (при довжині 100...300 мм).

Слід також зазначити, що цей спосіб обробки вимагає проведення суттєвої модернізації задньої бабки токарних верстатів (нової розробки), а також налічує значний недолік через необхідність навантаження опор шпинделя осьовою силою набагато більшою, ніж осьові сили різання. При цьому виникає необхідність у значному збільшенні зусиль затиску заготовок традиційним або спеціальним механізмом затиску.

В роботі [2] також описані способи обробки нежорстких валів з управлінням деформованого стану деталі за допомогою пружних опор у вигляді динамічних віброгасників. Досвід використання таких способів обробки виявив їх багаточисельні недоліки. По-перше, це складність конструкції і її налагодження. По-друге, неможливість продуктивної обробки ступінчастих валів. По-третє, попадання стружки під ролики, яке неможливо усунути, призводить до значного погіршення якості обробки, а в ряді випадків, взагалі, до неможливості її проведення в разі застосування рухомих конструкцій пружних опор.

Певне застосування набув також спосіб обробки декількома різцями, що розташовані в одній поперечній до осі оброблюваної деталі площині під кутом 180° один до одного, як зображено на рис. 1.

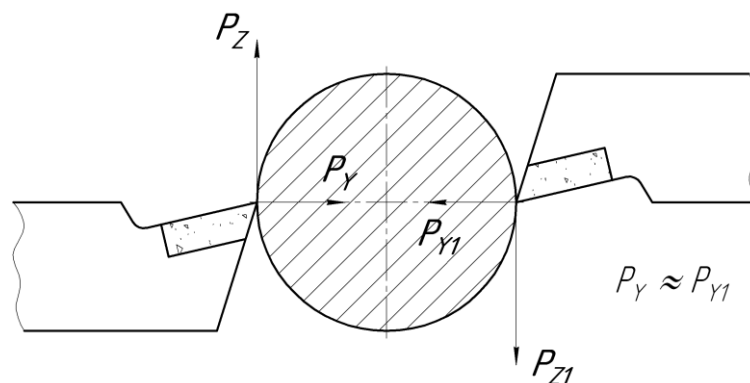


Рисунок 1 – Одночасна обробка двома протилежно розташованими різцями

Значною проблемою цього способу обробки є налагодження різців на необхідний діаметр обробки з однаковою глибиною різання. Нерівномірність зношування інструментів також погіршує точність обробки, тобто порушується певна урівноваженість сил різання P_Y з P_{Y1} .

Д.т.н., проф. Луців І. В., розглядаючи наведений спосіб обробки, створив і дослідив спосіб обробки нежорстких валів з усередненням складових сил різання P_X за рахунок самовстановлення різців в процесі обробки, що суттєво покращило якість виготовлених деталей [4] (рис. 2). Однак цей спосіб не уникнув наведених вище недоліків.

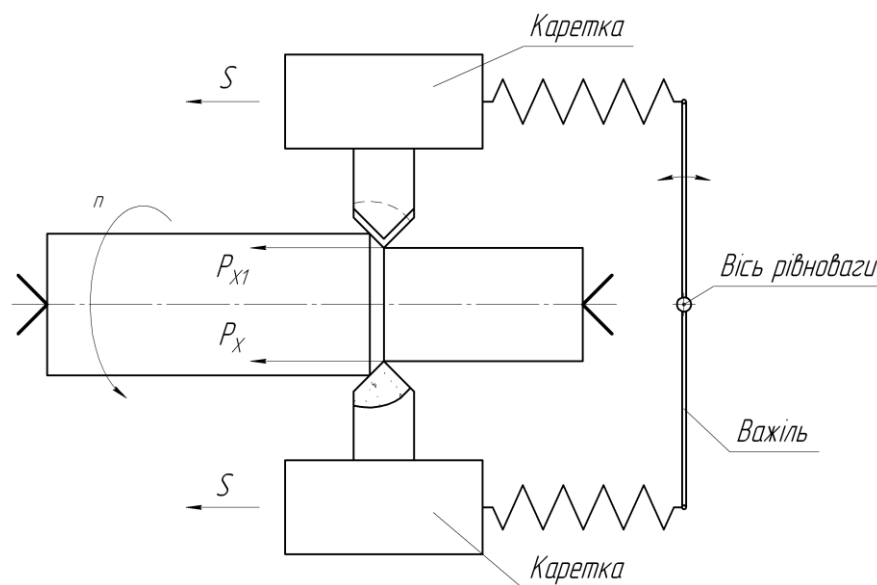


Рисунок 2 – Схема усереднення сил P_X і P_{X1} при обробці двома різцями

Відомих способів лезової обробки площинних деталей нежорсткої конструкції існує значно менше, ніж деталей типу тіл обертання. Їх розгляд здійснений в роботі [1]. У більшості випадків на машинобудівних підприємствах застосовують торцеве фрезерування зі зменшеними глибинами різання, адаптивним управлінням режимами обробки, базування і закріплення нежорстких заготовок з додатковими підвідними опорами тощо.

Викладення основного матеріалу. На базі аналізу діючих в процесі обробки складових сили різання авторами пропонується інший спосіб компенсації сил, що сприяють пружній деформації нежорстких деталей, які призводять до виникнення бочкоподібності при точінні деталей типу тіл обертання і опуклості при обробці фрезеруванням площинних деталей.

При обробці нежорстких деталей з усіх складових сили різання найбільший вплив на точність обробки чинить складова, перпендикулярна до оброблюваної поверхні.

У випадку вільного різання, коли в роботі бере участь лише головна різальна кромка, рівнодіюча сил різання в основній площині (P_{XY}) перпендикулярна до різальної кромки, і її напрям співпадає із напрямком сходу стружки ($\eta = 0^\circ$) [5, с. 127].

Однак набагато частіше доводиться мати справу з процесом невідільного різання, при якому допоміжна різальна кромка в залежності від геометричних параметрів інструменту та подачі бере участь у процесі різання. При цьому окремі елементи стружки намагаються пересуватися по передній поверхні інструменту у різних напрямках. В цьому випадку кут сходу стружки $\eta \neq 0^\circ$ (рис. 3). На рис. 3 зображена проекція кута сходу стружки на основну площину – η_{XY} [6, с. 204].

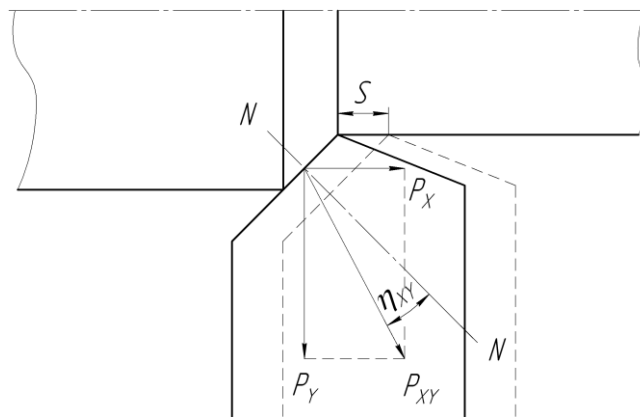


Рисунок 3 – Складові сили різання P_Y та P_X в умовах невідільного різання та їх рівнодіюча P_{XY}

Згідно з [8, с. 26] та [9, с. 76] напрям сходу стружки на початковому етапі її утворення збігається з напрямком рівнодіючої сил різання в основній площині. Отже, кут η_{XY} визначає співвідношення між радіальною P_Y та осьюовою P_X складовими сили різання:

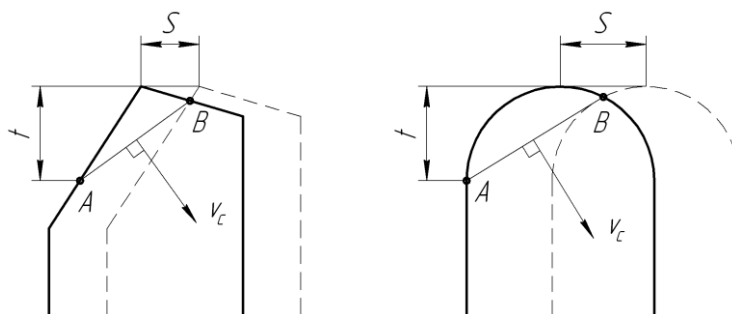
$$P_Y = P_{XY} \cdot \cos(\varphi - \eta_{XY}); P_X = P_{XY} \cdot \sin(\varphi - \eta_{XY}). \quad (1)$$

Виходячи з залежностей (1), для мінімізації складової сили різання, нормальної до обробленої поверхні ($P_Y \approx 0$) слід підібрати такий головний кут в плані φ , при якому кут $(\varphi - \eta_{XY}) \approx 90^\circ$, оскільки $\cos 90^\circ = 0$.

Отже, задача полягає в тому, щоб визначити кут сходу стружки при заданих параметрах обробки та знайти такий кут в плані, при якому мінімізується складова P_Y .

Згідно з [7, с. 74] та [9, с. 59] напрям сходу стружки в початковий момент перпендикулярний до прямої AB , яка у випадку роботи інструментом з загостреною вершиною (рис. 4, а) з'єднує частини різальних кромки, які безпосередньо беруть участь у процесі різання, а у

випадку роботи інструментом з заокругленою вершиною (рис. 4, б) з'єднає початок і кінець частини кромки, яка бере участь у різанні.



а б

Рисунок 4 – Напрямок сходу стружки: а – інструмент з загостреною вершиною; б – інструмент з заокругленою вершиною.

Скористаємось цією методикою для знаходження кута сходу стружки для загального випадку, коли різальна частина інструменту являє собою поєднання двох прямолінійних частин головної і допоміжної різальних кромки та заокругленої вершини. При цьому приймемо нульові значення головного переднього кута та кута нахилу головної різальної кромки ($\gamma = 0^\circ$, $\lambda = 0^\circ$).

За таких умов слід розглянути два випадки: 1 – коли попереднє і наступне положення різального інструменту перетинаються своїми криволінійною та прямолінійною ділянками відповідно (рис. 5, а), 2 – обома криволінійними ділянками, що залежить від величини подачі (рис. 5, б).

В першому випадку (рис. 5, а) подача знаходиться в межах:

$$\left\{ \begin{array}{l} S < \frac{r \cdot \operatorname{tg} \frac{\varphi_1}{2} \cdot \sin \varphi \cdot \sin \varphi_1 + r \cdot \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \cdot \sin \varphi \cdot \sin \varphi_1 + r \cdot \sin(\varphi + \varphi_1) - r \cdot \cos \varphi \cdot \sin(\varphi + \varphi_1)}{\sin \varphi \cdot \sin \varphi_1}; \\ S > 2 \cdot (r \cdot \operatorname{tg} \frac{\varphi_1}{2} + r \cdot \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \cdot \cos \varphi_1) \end{array} \right.$$

Кут сходу стружки дорівнюватиме:

$$\eta = \eta_1 + \eta_2, \quad (2)$$

де
$$\eta_1 = \operatorname{arctg} \left(\frac{NX' \cdot \sin(\varphi + \varphi_1)}{MY + NX' \cdot \cos(\varphi + \varphi_1)} \right) \quad (3)$$

$$\eta_2 = \arctg \left[\frac{MN \cdot \sin \left(\varphi - \eta_1 - \frac{\varphi - \varphi_1}{2} \right)}{\left(\frac{NX' \cdot \sin(\varphi + \varphi_1)}{\sin \eta_1} \right) + MN \cdot \cos \left(\varphi - \eta_1 - \frac{\varphi - \varphi_1}{2} \right)} \right] \quad (4)$$

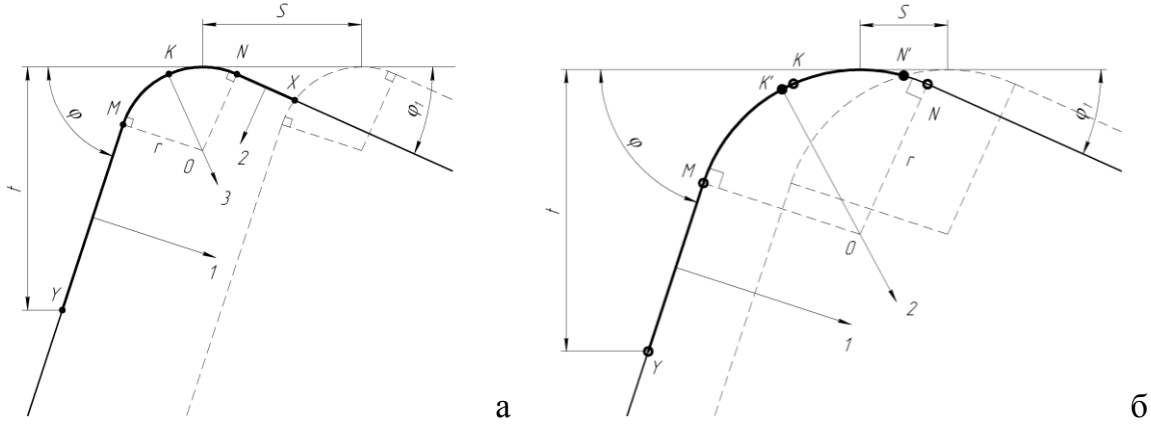


Рисунок 5 – Схема до визначення кута сходу стружки для загального випадку

В залежностях (3) і (4):

- довжина прямолінійної ділянки головної різальної кромки MY , що бере участь у процесі різання :

$$MY = \frac{t}{\sin \varphi} - r \cdot \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}, \quad (5)$$

- довжина заокругленої частини різальної кромки MN , що бере участь у процесі різання :

$$MN = \frac{\pi \cdot r \cdot (\varphi + \varphi_1)}{180^\circ}, \quad (6)$$

- довжина частини допоміжної різальної кромки NX' , що бере участь у процесі різання:

$$NX' = \frac{\left(S - r \cdot \operatorname{tg} \frac{\varphi_1}{2} - r \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right) \cdot \sin \alpha}{\sin(\varphi_1 + \alpha)} - r \cdot \operatorname{tg} \frac{\varphi_1}{2}, \quad (7)$$

де α – кут нахилу дотичної до заокругленої частини інструменту в точці X' , який визначається з тригонометричного рівняння:

$$\operatorname{tg}(\varphi_1) \cdot (S_{kp1} - S) - r \cdot \operatorname{tg}(\varphi_1) \cdot \sin \varphi + r \cdot \operatorname{tg}(\varphi_1) \cdot \sin \alpha - r \cdot \cos \alpha + r \cdot \cos \varphi = 0, \quad (8)$$

В другому випадку (рис. 5, б) прямолінійна частина допоміжної різальної кромки в процесі різання участі не бере, а подача має значення:

$$S < 2 \cdot (r \cdot \operatorname{tg} \frac{\varphi_1}{2} + r \cdot \operatorname{tg} \frac{\varphi_1}{2} \cdot \cos \varphi_1).$$

За таких умов кут сходу стружки:

$$\eta = \operatorname{arctg} \left[\frac{MN' \cdot \sin \left(\varphi - \frac{\varphi - \arcsin [S/(2r)]}{2} \right)}{MY + MN' \cdot \cos \left(\varphi - \frac{\varphi - \arcsin [S/(2r)]}{2} \right)} \right], \quad (9)$$

де MN' – довжина дуги різальної кромки, що бере участь у процесі різання:

$$MN' = \frac{\pi \cdot r \cdot (\varphi + \beta)}{180^\circ}, \quad (10)$$

де $\beta = \arcsin \left(\frac{S}{2r} \right).$

В роботі [8, с. 26] пропонується визначати кут сходу стружки наступним чином:

$$\eta = \operatorname{arctg} \left(\frac{F_X}{F_Y} \right), \quad (11)$$

де F_X та F_Y – проекції умовної поверхні зсуву при невірному різанні (рис. 6).

На основі цих міркувань автором роботи [8] отримана наступна залежність для визначення кута сходу стружки при $\gamma = 0^\circ$, $\lambda = 0^\circ$:

$$\eta = \operatorname{arctg} \left(\frac{0,5 \cdot r \cdot \sin \varphi \cdot \left\{ 1 - \cos \left[\varphi + \arcsin \left(\frac{S}{2r} \right) \right] \right\}}{t + r \cdot (\cos \varphi + 0,5 \cdot \sin \varphi - 1) + 0,5 \cdot S \cdot \cos \varphi \cdot \sin \varphi} \right), \quad (12)$$

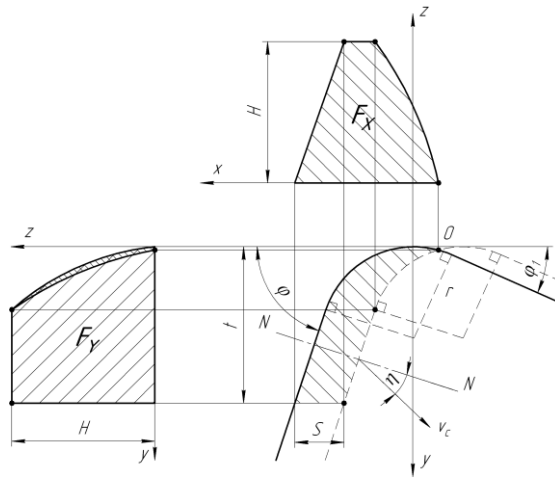


Рисунок 6 – Схема до визначення кута сходу стружки за методом [8]

На основі двох описаних вище методів розрахунку кута сходу стружки було знайдено значення головного кута в плані φ інструменту, при якому повинна мінімізуватися складова сили різання P_Y для вихідних умов, вказаних в табл. 1:

Таблиця 1 – Вихідні умови для визначення головного кута в плані φ , при якому компенсується радіальна складова сили різання

Оброблюваний матеріал	сталь 45, $\sigma_s = 600$ МПа
Інструментальний матеріал	T15K6
Розміри оброблюваної деталі	діаметр: $d = 20$ мм довжина: $L = 250$ мм
Геометричні параметри інструменту	допоміжний кут в плані: $\varphi_1 = 10^\circ$ головний передній кут: $\gamma = 0^\circ$ головний задній кут: $\alpha = 8^\circ$ кут нахилу головної різальної кромки: $\lambda = 0^\circ$ радіус при вершині: $r = 0,2$ мм
Режими різання	глибина: $t = 2$ мм подача: $S = 0,05$ мм/об швидкість різання: $v = 40$ м/хв

Результати розрахунків наведено в табл. 2.

Таблиця 2 – Результати теоретичних розрахунків

№ з/п	Метод 1: Розрахунок за залежностями (2) – (10)			Метод 2: Розрахунок за залежностями (11) – (12)		
	$\varphi, ^\circ$	$\eta, ^\circ$	$\varphi - \eta, ^\circ$	$\varphi, ^\circ$	$\eta, ^\circ$	$\varphi - \eta, ^\circ$
1	90	7,16	82,84	90	2,75	87,25
2	91	7,3	83,7	91	2,8	88,2
3	92	7,44	84,56	92	2,85	89,15
4	93	7,58	85,42	93	2,9	90,1
5	94	7,71	86,29	94	2,95	91,05
6	95	7,85	87,15	95	2,99	92,01
7	96	7,98	88,02	96	3,04	92,96
8	97	8,11	88,89	97	3,09	93,91
9	98	8,24	89,76	98	3,13	94,87
10	99	8,37	90,63	99	3,18	95,82
11	100	8,5	91,5	100	3,22	96,78

З табл. 2 видно, що значення кута сходу стружки η та головного кута в плані φ для мінімізації P_Y (тобто такі, при яких кут $\varphi - \eta \approx 90^\circ$), розраховані за залежностями (2) – (10) згідно з міркуваннями,

викладеними в [7] та [9], складають: $\eta \approx 8^\circ$; $\varphi \approx 98^\circ$, а значення цих же параметрів, розраховані за способом [8] за залежностями (11) – (12), дещо інші і складають: $\eta \approx 3^\circ$; $\varphi \approx 93^\circ$.

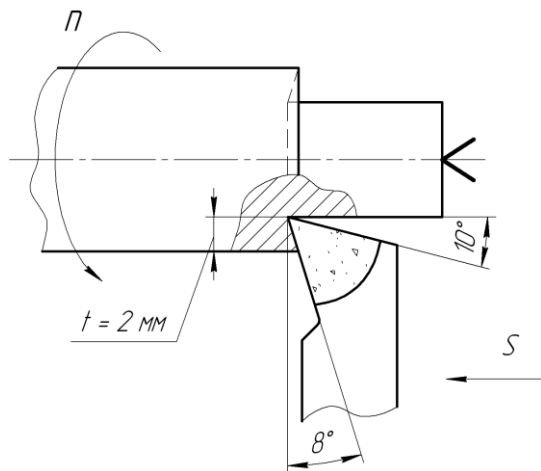


Рисунок 7 – Схема видалення припуску з урівноваженням складової сили різання P_Y при точінні

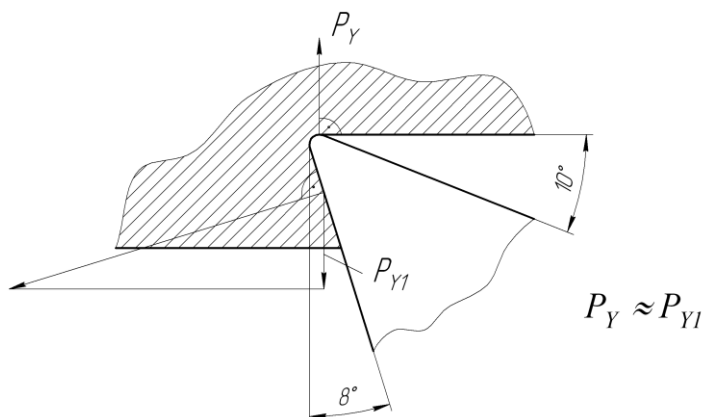


Рисунок 8 – Схема діючих сил різання і їх складових в процесі обробки за новим способом

З метою перевірки теоретичних розрахунків запропонованого способу обробки нежорстких деталей в лабораторії Житомирського державного технологічного університету проведені експериментальні дослідження на токарно-гвинторізному верстаті мод. 16K20. Були оброблені дві партії заготовок: $d = 20$ мм, $L = 250$ мм, матеріал – сталь 45 (рис. 10) на наступних режимах різання: $n = 630$ об/хв, $t = 2$ мм, $S = 0,05$ мм/об.

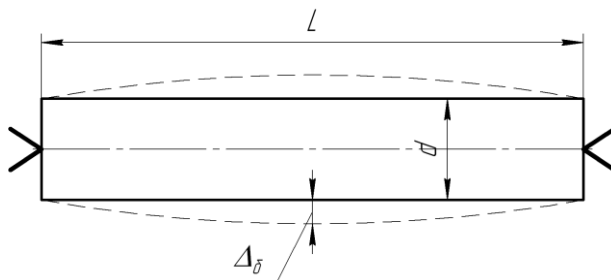


Рисунок 10 – Ескіз оброблюваної заготовки: Δ_{δ} – величина бочкоподібності, що виникає внаслідок відтискання інструменту при обробці традиційним способом

Обробка першої партії проводилась прохідним різцем Т15К6 з такими геометричними параметрами: $\varphi = 45^\circ$, $\varphi_1 = 10^\circ$, $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 8^\circ$, $\lambda = 0^\circ$, радіус при вершині $r = 0,2$ мм. Обробка другої партії – підрізним різцем: $\varphi = 98^\circ$, $\varphi_1 = 10^\circ$, $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 8^\circ$, $\lambda = 0^\circ$, $r = 0,2$ мм. В обох випадках люнет не застосовувався.

Середнє значення бочкоподібності першої партії: $\bar{\Delta}_{\delta} = 0,21$ мм. Теоретичне значення бочкоподібності визначалось згідно з [2, с.6]:

$$\Delta_{\delta} = -\frac{P_Y}{6E \cdot I \cdot L} \cdot x^4 + \left(\frac{P_Y}{6E \cdot I} - \frac{P_X \cdot d}{12E \cdot I \cdot L} \right) \cdot x^3 + \frac{(2P_Y \cdot L - P_X \cdot d) \cdot \omega_{3.б.}}{2L} +$$

$$+ \left[P_Y \cdot \frac{(\omega_{н.б.} - \omega_{3.б.})}{L} + P_X \cdot d \cdot \frac{(\omega_{н.б.} + \omega_{3.б.})}{2L^2} + \frac{P_X \cdot d \cdot L}{2E \cdot I} \right] \cdot x \quad , (13)$$

де $x = \frac{2}{3}L - \frac{P_X \cdot d}{3P_Y}$ – координата положення інструменту, що відповідає максимальному значенню прогину; $\omega_{3.б.} = 0,00032$ мм/Н – податливість передньої бабки верстату; $\omega_{н.б.} = 0,00004$ мм/Н – податливість задньої бабки верстату; L і d – відповідно довжина та діаметр заготовки; $E = 2 \cdot 10^5$ Н/мм²

– модуль пружності оброблюваного матеріалу; $I = \frac{\pi \cdot d^4}{64}$ – момент інерції круглого перерізу заготовки; $P_X \approx 412$ Н та $P_Y \approx 295$ Н – відповідно осьова та радіальна складові сили різання, визначені за залежністю, наведеною в [10, с. 271]:

$$P_{X,Y} = 10 \cdot C_p \cdot t^x \cdot S^y \cdot v^n \cdot K_p \quad (14)$$

Розрахункове значення бочкоподібності, визначене за формулою (13) для заданих умов: $\Delta_{\delta} \approx 0,209$ мм.

Похибка у вигляді бочкоподібності при обробці другої партії деталей не спостерігалась. Також не відбувалось інтенсивне зношування ріжучого інструменту. Процес обробки проходив при застосуванні нового способу без помітних вібрацій на відміну від обробки звичайним прохідним різцем.

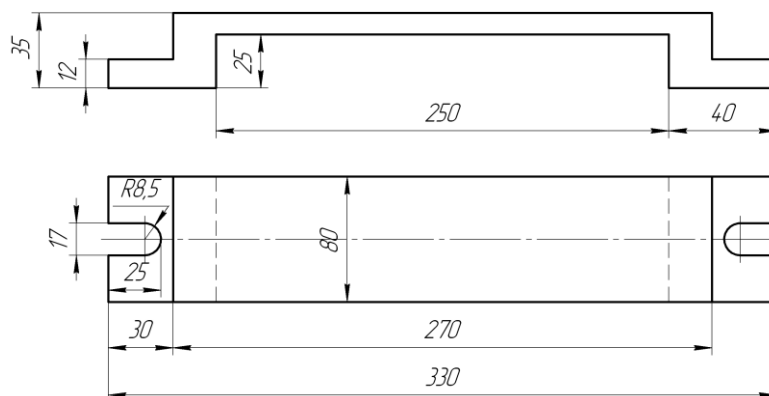


Рисунок 11 – Приклад плоскої поверхні нежорсткої деталі, що підлягає обробці торцевим фрезеруванням

При обробці плоскої поверхні ($B \times L = 80 \times 250$ мм) деталі, зображеної на рис. 11, максимальний прогин посередині деталі (рис. 12, а), наближено розраховується за залежністю:

$$\Delta_{\max} = \frac{P_y \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I_z}, \quad (15)$$

де $I_z = \frac{B \cdot h^3}{12}$ – момент інерції перерізу плити відносно осі z (рис. 12, б); $P_Y \approx 0,55 \cdot P_Z \approx 631$ Н – складова сили різання, нормальна до оброблюваної поверхні, визначена згідно з [10, с. 292]; $P_Z \approx 1147$ Н – головна дотична складова сили різання, визначена згідно з [10, с. 262]:

$$P_Z = \frac{10 \cdot C_p \cdot t^x \cdot S_z^y \cdot B^u \cdot z}{D_{\text{фр}}^q \cdot n^w} \cdot K_{\text{мр}} \quad (16)$$

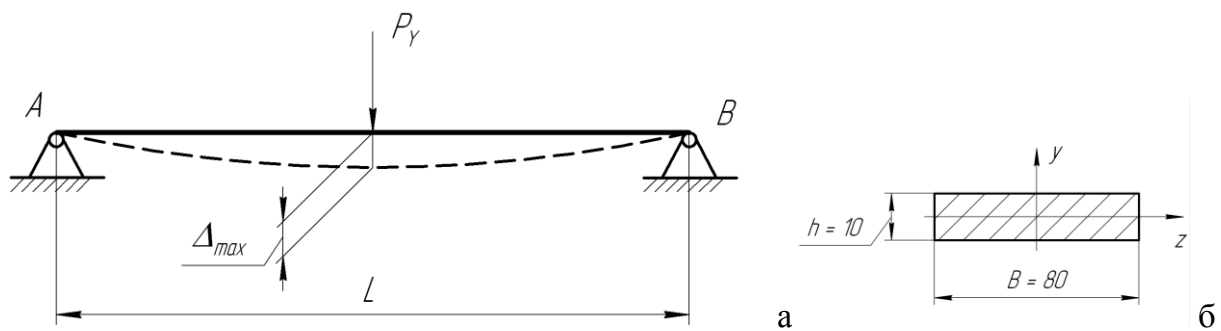


Рисунок 12 – Схема до визначення максимального прогину плити (а); схема до визначення осьового моменту інерції перерізу плити (б)

Для наступних вихідних умов: $n = 315$ об/хв, $t = 3$ мм, $S = 0,2$ мм/об; $D_{\text{фр}} = 100$ мм; $B = 80$ мм, $z = 8$; оброблюваний матеріал – сталь 45, інструментальний матеріал – Т15К6 розрахункове значення прогину при обробці деталі (рис. 11) складає: $\Delta_{\max} \approx 0,154$ мм.

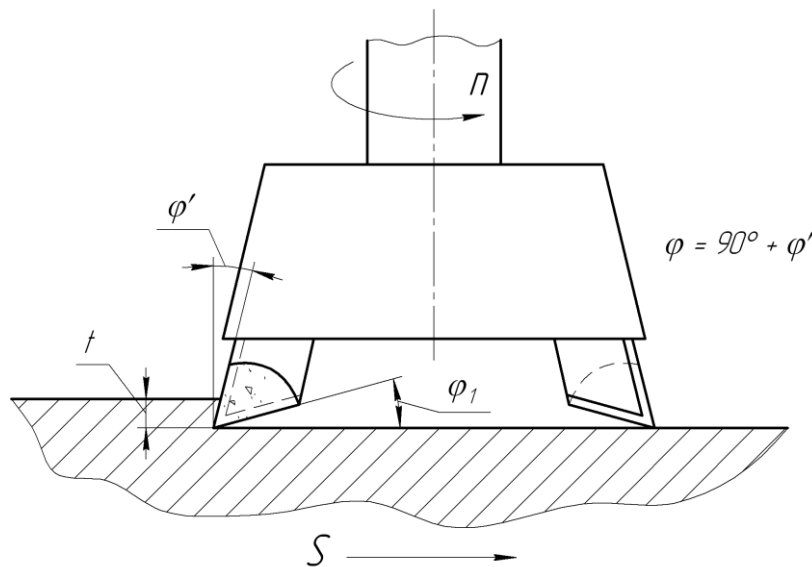


Рисунок 13 – Схема видалення припуску з урівноваженням складової сили різання P_Y при торцевому фрезеруванні

Висновки. Отримані позитивні результати при експериментальній перевірці запропонованого способу. Проведені дослідження підтвердили доцільність більш глибокого аналізу нового способу обробки нежорстких деталей, а саме використання можливостей урівноваження діючих сил у напрямку, перпендикулярному до оброблюваної поверхні як при точінні, так і при торцевому фрезеруванні нежорстких деталей.

Визначена теоретична взаємозалежність режимів обробки, геометрії ріжучого клина, кута сходу стружки і діючих сил різання для визначення головного кута в плані інструменту, необхідного для компенсації складової сили різання, нормальної до оброблюваної поверхні.

В подальших дослідженнях передбачається проведення поглиблених експериментальних і теоретичних визначень впливів різноманітних факторів на якість обробланих поверхонь, а також інтенсивність зношування ріжучого інструменту.

Перелік посилань: 1. Мельничук П. П. Техніко-технологічні підходи удосконалення процесу торцевого фрезерування плоских поверхонь нежорстких деталей / П. П. Мельничук, В. Ю. Лосєв, О. В. Головатенко // Вісник ЖДТУ. – 2008. – Випуск III (46), Том 1. – С. 16-25. 2. Тараненко В. А. Технологические способы и средства повышения точности обработки нежестких деталей / В. А. Тараненко, В. Г. Митрофанов, М. Г. Косов. – М.: ВНИИТЭМР, 1987. – 64 с. 3. Тараненко В. А. Повышение точности механической обработки деталей при использовании систем автоматического управления / В. А. Тараненко, Д. А. Каинов. – К. : Общество «Знание» Ук.ССР, 1981. – 24с. 4. Луців І. В. Основи створення багатолезового оснащення з міжінструментальними зв'язками для обробки поверхонь обертання : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра. техн. наук : спец. 05.03.01 «Процеси механічної обробки, верстати та інструменти» / І. В. Луців. – Київ, 2006. – 39 с. 5. Ящерицын П. И. Теория резания. Физические и тепловые процессы в технологических системах : [учеб. для вузов] / П. И. Ящерицын, М. Л. Еременко, Е. Э. Фельдштейн. – Минск: Выш. шк., 1990. – 512 с. 6. Бобров В. Ф. Основы теории резания металлов / В. Ф. Бобров. – М.: Машиностроение, 1975. – 344 с. 7. Армарево И. Д. Обработка металлов резанием / И. Д. Армарево, Р. Х. Браун; пер. с англ. В. А. Пастунова. – М. : Машиностроение, 1977. – 325 с. 8. Петрушин С. И. Введение в теорию несвободного резания материалов : [учеб. пособие] / С. И. Петрушин. – Томск: ТПУ, 1999. – 97 с. 9. Куфарев Г. А. Стружкообразование и качество обработанной поверхности при несвободном резании / Г. А. Куфарев, К. Б. Окенов, В. А. Говорухин. – Фрунзе : «МЕКТЕП», 1970. – 170 с. 10. Справочник технолога-машиностроителя : Т. 2 / под ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова. – [4-е изд.]. – М. : Машиностроение, 1985. – 486 с.

M. RYBICKI, PhD. Eng.,

M. KAWALEC, Prof. DSc. Eng., Poznań, Poland

SELECTED PROBLEMS OF FACE MICRO-MILLING OF HARD STEEL

У статті представлені результати досліджень подовжених і поперечних відхилень. Дослідження перевели під час точного торцевого фрезерування пластинами з кераміки інструментальної сталі 55NiCrMo у загартованому стані при твердості 52 HRC. Відхилення прямолінійності вимірювали до й після компенсації методом корекції шляхів пластини фрези стосовно оброблюваного виробу.

В статье представлены результаты исследований удлиненных и поперечных отклонений. Исследования перевели во время точного торцевого фрезерования пластинами из керамики инструментальной стали 55NiCrMoV в закаленном состоянии при твердости 52 HRC. Отклонения прямолинейности измеряли до и после компенсации методом коррекции пути пластины фрезы по отношению к обрабатываемому изделию.

In clause results of researches of the extended and cross-section deviations are presented. Researches have translated during exact face milling by plates from ceramics of tool steel 55NiCrMoV in the tempered condition at hardness 52 HRC. Deviations of straightforwardness measured before and after indemnification by a method of correction of a way of a plate of a mill in relation to a processable product.

INTRODUCTION

Machined surfaces of many workpieces e.g. deck faces of engine blocks or mould joints, meets role of sealing faces, so flatness of the faces is of great practical importance. Simultaneously from many years is visible tendency of replacing some grinding operations of hardened steels with precision turning and milling [2, 3].

Possibility of shape accuracy increasing by controlling of wedge position, applied in turning [9], has not been recognized well during face milling by large diameter mills and for matter of correctional path impact on deviations in various longitudinal and transverse sections. Park et al. [6] have compensated deviation in longitudinal section during face milling by tool path assigned to axis of small diameter end mill. In authors opinion compensation with correctional path assigned to axis of large face mills and with large angular error motion components could cause “undercutting” problem of work surface.

RANGE AND CONDITIONS OF RESEARCH

Research were carried out during symmetrical dry face milling of hot work tool steel 55NiCrMoV (52HRC) in conditions presented in tab. 1.

For registration of machined surface profiles incremental length gauge MT12B with resolution 0,0005 mm and ball-shaped contact tip was used (1a at fig. 1). The gauge was fixed to frame of milling machine and it was moving during measurement in axis X and Y of the milling machine coordinate system. Longitudinal profiles $Z = f(X)$ and transverse profiles $Z = f(Y)$ were registered in various sections of machined surface (fig. 4). Feedrate was parallel to X axis direction (fig. 1).

Table 1 – Selected cutting conditions

Workpiece:	55NiCrMoV (52HRC), $a_e = 90$ mm, $L = 250$ mm
Face mill:	$D = 100$ mm, $z = 1$, $\alpha_p = 6^\circ$, $\gamma_p = -6^\circ$, $\gamma_f = -11^\circ$
Cutting parameters:	$v_c = 352$ m/min, $f_z = 0,06$ mm/wedge, $a_p = 0,1$ mm
Cutting insert:	SNGN 120408 T02020, $Al_2O_3 + TiC$
Wedge wear:	$VB_c = 0-0,3$ mm

Machined surface profiles were interpolated by polynomials (4-th order for longitudinal profile and 2-nd order for transverse profile) to make assesment of the deviations values $STRt_w$ and $STRt_p$ easier. The deviations value were gave as a distance between maximal and minimal position of approximated profiles $Z = f(X)$ and $Z = f(Y)$ measured relative to movement path of the gauge. Values of the deviations from profiles concave relative to adhered line were treated as positives and from convex ones as negatives.

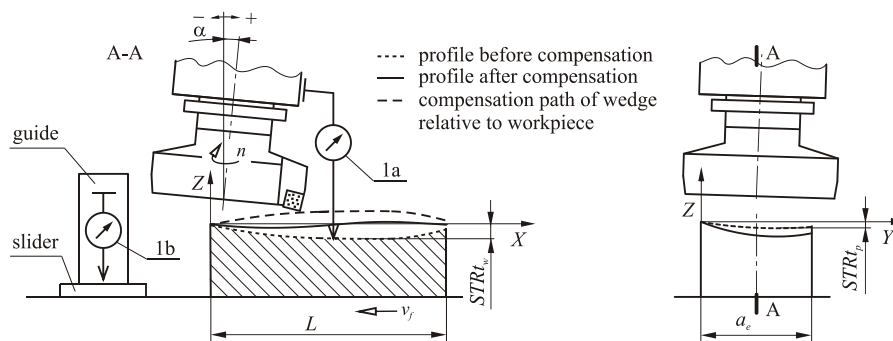


Figure 1 – Measurement scheme of movement accuracy of face mill and minimization of deviations in longitudinal sections [7]

It was checked before compensation if mechanisms of milling machine can realize few micrometers vertical displacements of face mill relative to workpiece. To this end path $Z = f(X)$ assumed in control system was compared to real vertical displacement of milling machine units. The real displacement was measured by the incremental length gauge (1b at fig. 1), which

measurement tip was touching slider of the milling machine moving vertically according to the imposed path $Z = f(X)$. The accuracy test was done in an idle run and during cutting.

Mirror image relative to X axis of profile in longitudinal section intersecting axis of face mill was assumed to be compensation path of face mill in next pass. Beginning of the path was assigned to front of face mill which formed machined surface due to tilt of face mill axis by α angle (fig. 1). After compensation pass profiles were registered in the same sections what in the pass before compensation.

RESULTS AND ANALYSIS OF RESEARCH

Imposed vertical displacement of milling machine table was realized with accuracy creating basis for compensation of a few micrometers deviations, without necessity of hydraulic or piezoelectric precision positioning systems applying (fig. 2). Real displacement $Z = f(X)$ of face mill relative to workpiece was much lesser accurate (fig. 3).

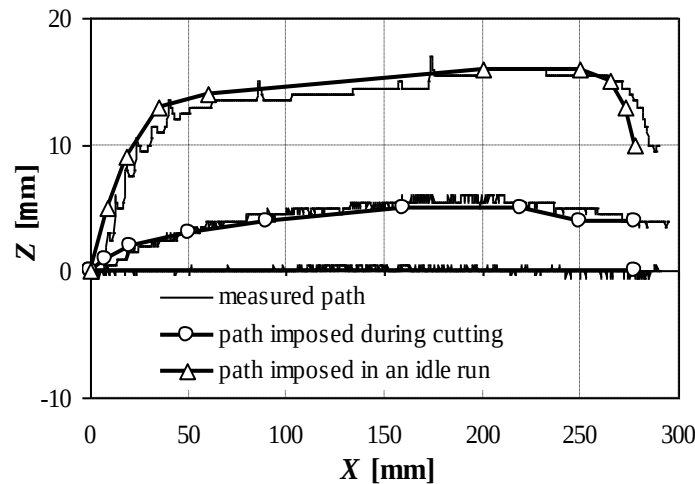


Figure 2 – Comparison of imposed vertical displacements with real (measured) displacements of milling machine table

In middle longitudinal section intersecting axis of face mill deviation $STRt_w$ has the highest value [3, 7]. Correction of wedge path relative to workpiece has allowed decreasing to about $5 \mu\text{m}$ and equalizing deviations $STRt_w$ in all longitudinal sections. However increasing of values $STRt_p$ has appeared at beginning of length X (fig. 3).

Reason for increasing of the $STRt_p$ value was increasing of the mill axis tilt angle $\alpha + d\alpha$ measured relative to tangent to compensation path in contact point of wedge with workpiece [8]. For example rising of compensation path by $5 \mu\text{m}$ on length $X = l_\psi \approx 28 \text{ mm}$ has caused rising of transverse profile at the ends of workpiece width measured on length $X = 1 \text{ mm}$ by similar value. In case of concave deviation before applying the compensation path it caused increasing of deviation $STRt_p$ after compensation (fig. 3). Limiting analysis at the figure to

less milling width it can be easily imagine that impact of compensation path on deviation in transverse section will be lesser.

Efficiency of machined surface flatness improvement by correction of wedge path depends on value and sign of the α angle of face mill axis tilt in feed direction as well as shape of compensated longitudinal profile. The most often profile in longitudinal section declines on milling length (is degressive). At fig. 4 is shown some typical machined surfaces before and after compensation for degressive profile in longitudinal section and various angles α .

If $\alpha > 0^\circ$ and tilt of longitudinal profile $d\alpha = dZ/dX < \alpha$ compensation path, being mirror image of longitudinal profile relative to X axis, will caused decreasing of deviation $STRt_w$ and increasing of deviation $STRt_p$ [7]. If $\alpha > 0^\circ$ and $\alpha > d\alpha$ whole machined surface will be cutted repeatedly by back of the mill.

When longitudinal profile is degressive although tilt of face mill axis by angle $\alpha = 0^\circ$ deviation $STRt_p$ will not be zero, but transverse profile will be concave and formed by back of the mill. Whereas after compensation both $STRt_w$ and $STRt_p$ deviations can be minimized, what causes bi-directional lay formation on whole machined surface (fig. 4) [4,5,7].

In case of face mill axis tilt by angle $\alpha < 0^\circ$ transverse profile formed by back of the mill will be lesser concave after compensation, but deviation $STRt_p$ will not be zero.

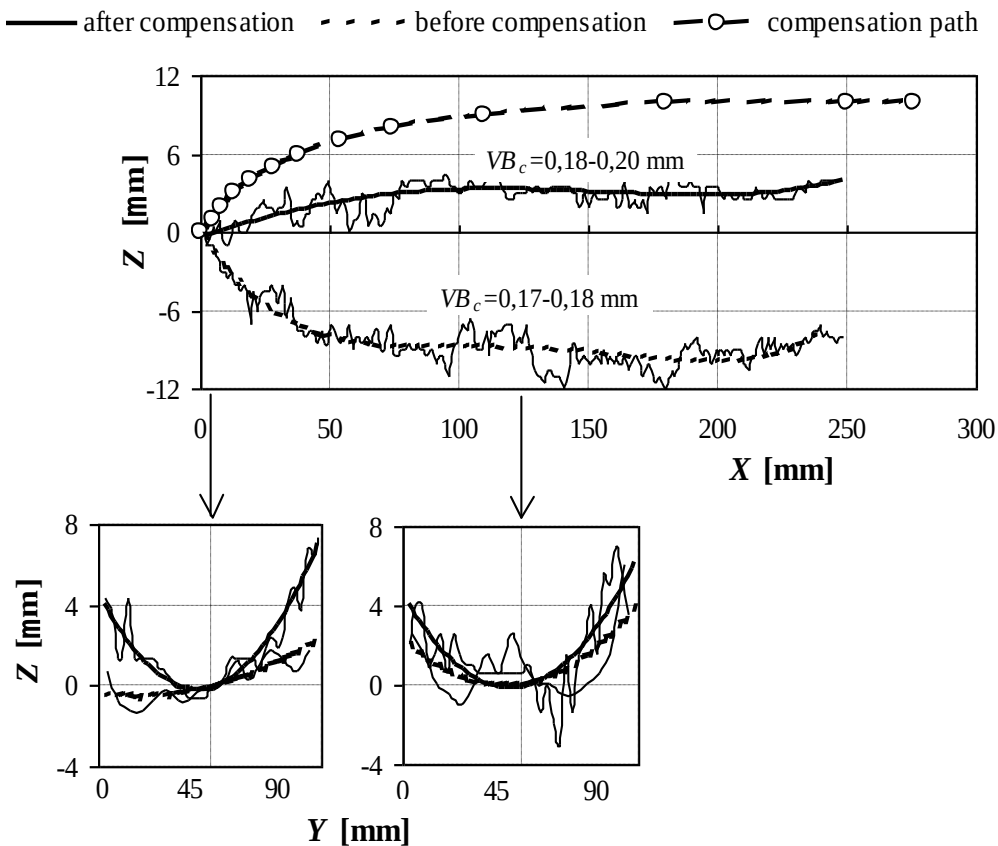


Figure 3 – Impact of compensation path on profile in middle longitudinal section and profiles various transverse sections (basis on [8])

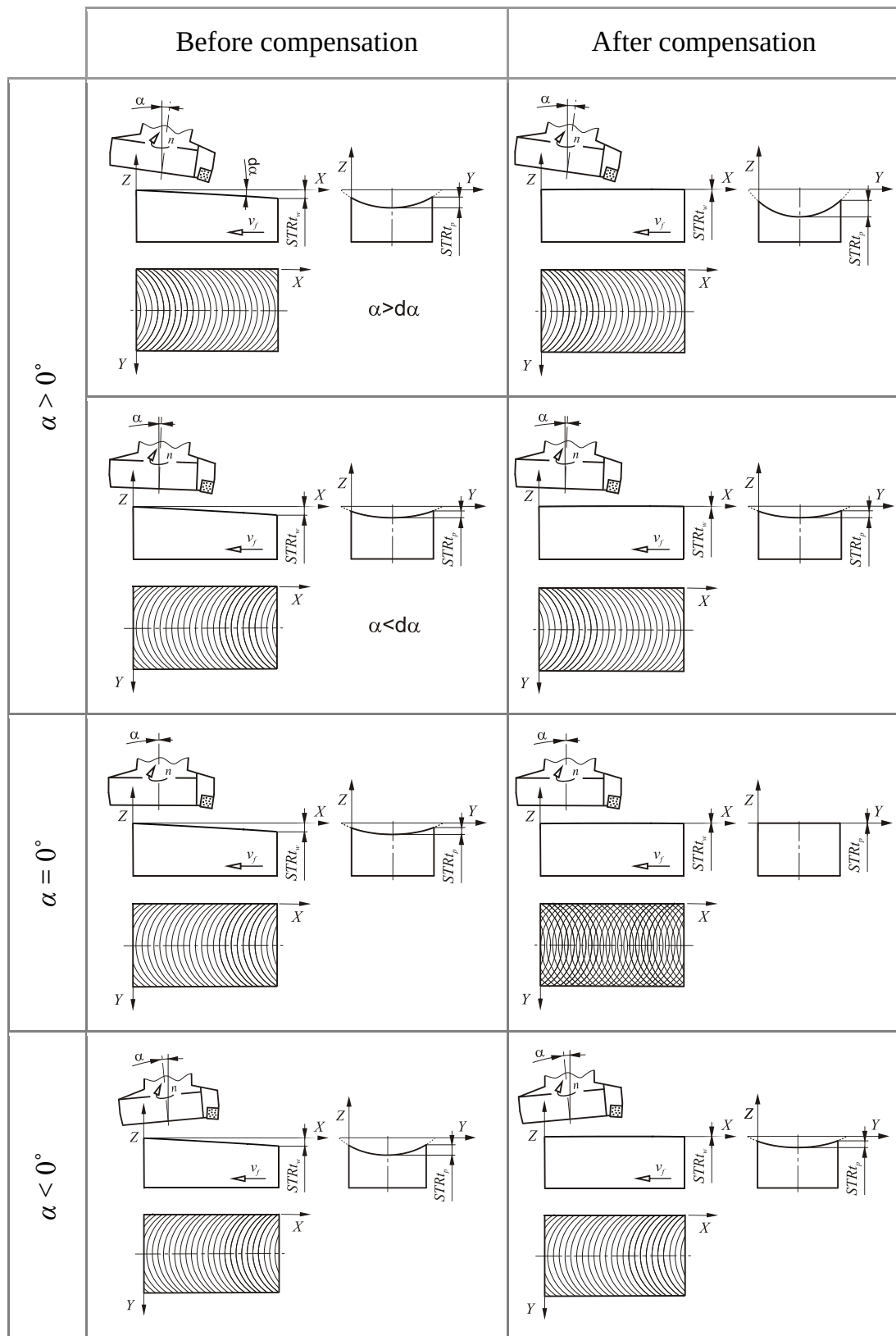


Figure 4 – Machined surfaces before and after compensation for various angles α of face mill axis tilt

CONCLUSIONS

Diversification of deviations in various sections is mainly result of geometric-kinematic action of face mill. In longitudinal section intersecting axis of face mill deviation STR_{t_w} has the highest value. Profile in longitudinal section (being real path of face mill) is misalignment, what has impact on diversification of deviation STR_{t_p} measured in various transverse sections.

It is possible to minimize deviations in all longitudinal sections by correction of mill path relative to workpiece. Compensation path has impact on deviations in transverse sections and the impact is higher during milling of wider surface. Efficiency of machined surface flatness improvement by this type of compensation depends on value and sign of face mill tilt angle α as well as shape of compensated longitudinal profile. Only for tilt of face mill axis by angle $\alpha = 0^\circ$ both STR_{t_w} and STR_{t_p} deviations can be minimized after compensation.

References: 1. Gu, F., - Melkote, N., - Kapoor, S.G., DeVor, R.E. (1997): A model for prediction of surface flatness in face milling. ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 119, p. 476-484, 2. Kawalec, M. (1990): Skrawanie hartowanych stali i żeliwa narzędziami o określonej geometrii ostrza. Rozprawy, 234, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, Poland, 3. Kawalec M., - Jankowiak M., - Nowakowski Z., - Twardowski P., - Rybicki M. (2006): Research into processes of turning, milling and drilling of hardened steels. Zbirk naukovikh statejj, Khar'kiv NTU "KhPI" vol.1, p. 116-125, 4. Kawalec, M., - Rybicki, M. (2009): Struktura geometryczna powierzchni po frezowaniu czołowym zahartowanej stali, Mechanik, 10, p. 779-785, 5. Olszak, W. (2008): Obróbka skrawaniem. WNT, Warszawa 2008, 6. Park, C.W., - Eman, K.F., - Wu, S.M. (1988): An in-process flatness error measurement and compensatory control system. Journal of Engineering for Industry, 110, p. 263-270, 7. Rybicki, M. (2008): Machined surface deviations of hardened steel and their minimization in the process of face milling. PhD thesis, under M. Kawalec, Faculty of Mechanical Engineering and Management, Poznan University of Technology, Poznań, Poland (in polish), 8. Rybicki M., - Kawalec M. (2008): Impact of tilt and deformation of face mill on technological effects of finish milling. Zbirk naukovykh prac "Suchasni tekhnologijj v mashinobudovanni", vol.2, Kharkiv NTU „KhPI”, p. 154-158, 9. Twardowski, P. (2004): Minimalizacja odchylek zarysu wzdłużnego podczas dokładnego toczenia stali zahartowanej, Mechanik, 8/9: p. 517.

ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 621.91.002.5

В. В. БЫКОВ, Горловка, Україна

ВЛИЯНИЕ СИЛ ТРЕНИЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ СРАБАТЫВАНИЯ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

У статті розглянутий вплив сил тертя на ефективність спрацьовування адаптивної системи управління. Установлено, що точність спрацьовування АСУ токарського верстата із прямими напрямними для відновлення гальмових дисків у значній мірі визначається коефіцієнтами тертя в напрямних різцетримачах.

В статье рассмотрено влияние сил трения на эффективность срабатывания адаптивной системы управления. Установлено, что точность срабатывания АСУ токарного станка с прямоугольными направляющими для восстановления тормозных дисков в значительной степени определяется коэффициентами трения в направляющих резцедержателях.

Character of action forces friction in rectangular directing slidings of a lathe with an internal adaptive control system and its influence on accuracy of a relative positioning of the tool and a processed detail is considered. Dependence between friction factor in directing holders of cutters and accuracy of operation of the adaptive control system is revealed.

Одним из методов управления точностью процесса резания является восстановление первоначальной точности взаимного расположения инструмента и обрабатываемой детали [1,2,3]. Это актуально при двурезцовой токарной обработке тормозных дисков автомобилей с применением токарного станка с внутренней адаптивной системой управления (АСУ). Такой станок разработан в лаборатории диагностики кафедры «Технической эксплуатации автомобилей» АДИ ДонНТУ и позволяет вести обработку поверхностей тормозных дисков непосредственно на автомобиле (рис.1). Направляющие резцедержателей станка обеспечивают необходимое взаимное расположение резцов и возможность их перемещения относительно тормозного диска. Они обеспечивают взаимные возвратно-поступательные движения резцедержателей с одной степенью свободы и имеют прямоугольную форму, а действующие силы в направляющих постоянно изменяются, и определяются как составляющая силы резания и силы трения в направляющих. Скорости скольжения в направляющих определяются кинематикой и динамикой функционирования АСУ, что определяет их систему смазки и защиту от загрязнений. Наиболее существенными требованиями к направляющим являются: надежность, долговечность,

ремонтпригодность, стабильность, геометрическая точность, оптимальная жесткость, минимальные силы трения.

В связи с этим целью исследования является изучение влияния сил трения в прямоугольных направляющих токарного станка для восстановления тормозных дисков автомобилей на точность срабатывания адаптивной системы управления.

Для достижения поставленной цели рассмотрим характер действия сил трения в направляющих скольжения двурезцового токарного станка с внутренней АСУ и гидравлической системой выравнивания сил, изображенных на рисунке 2 и 3. На каждом резце, закрепленном на передних концах направляющих, действуют составляющие силы резания P_x, P_y, P_z . Полости гидроцилиндров соединены между собой. Перемещению резцедержателей препятствуют силы трения $F_{тр1}$ и $F_{тр2}$, обусловленные реакциями опор R_1 и R_2 .

Если предположить, что в начальный момент времени система находится в равновесии и силы резания, действующие на резцах одинаковы, то осевые составляющие силы резания уравниваются силами давления жидкости, действующими на поршни, силами со стороны демпфирующих пружин и силами трения. При изменении силы резания на резце нарушается равновесие, но благодаря АСУ система будет стремиться достичь нового состояния равновесия, что соответствует выравниванию осевых сил резания в результате перераспределения мгновенных подач между резцами. Однако этому препятствуют силы трения, вызывающие нарушение равновесия сил резания между собой. Таким образом, существует определенное соотношение сил резания на резце, при котором система не обеспечивает полного выравнивания сил резания. Это соотношение определяет точность срабатывания ($\gamma_{ср}$) АСУ с учетом сил трения [4].

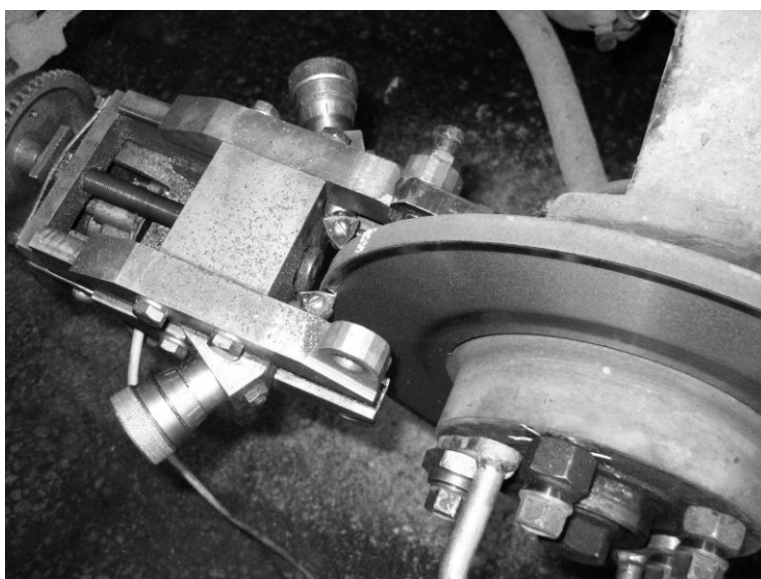


Рисунок 1– Станок для проточки тормозных дисков

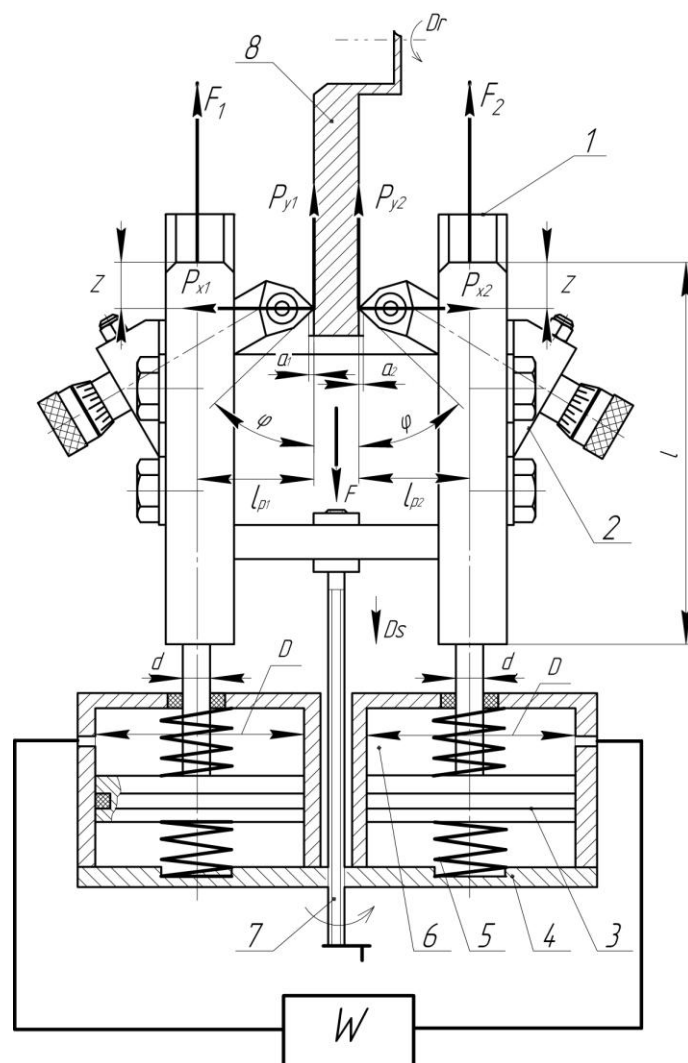


Рисунок 2 – Схема действующих сил в направляющих резцедержателей:
 1. Направляющая резцедержателя 2. Резцедержатель. 3. Поршень. 4. Корпус.
 5. Пружина. 6. Полость. 7. Функция. 8. Тормозной диск.

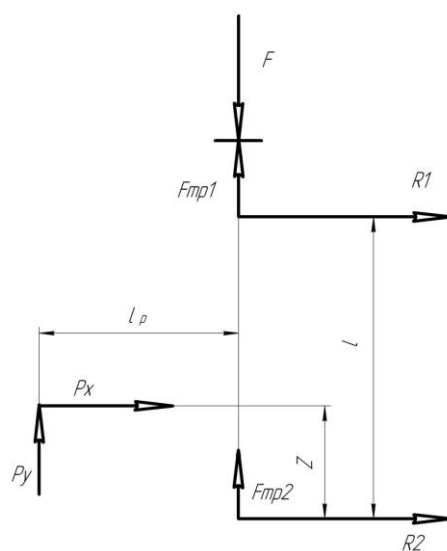


Рисунок 3 – Схема действия сил

Тангенциальная составляющая силы резания в статике:

$$P_z = k_p \cdot a_c, \quad (1)$$

где a_c – статическая толщина среза, k_p – коэффициент резания.

Радиальная составляющая:

$$P_y = \mu_{mp} \cdot k_p \cdot \sin \varphi \cdot a_c. \quad (2)$$

Осевая составляющая:

$$P_x = \mu_{mp} \cdot k_p \cdot \cos \varphi \cdot a_c, \quad (3)$$

где μ_{mp} – коэффициент трения стружки о переднюю поверхность резца, φ – главный угол в плане.

В состоянии покоя $P_{y1} > P_{y2}$, соответственно получим систему уравнений (4)

$$\begin{aligned} P_{y1} - f_n \cdot R_{21} - f_n \cdot R_{11} - F_1 &= 0; \\ P_{y2} + f_n \cdot R_{22} + f_n \cdot R_{12} - F_2 &= 0, \end{aligned} \quad (4)$$

f_n – максимальные значения коэффициента трения в паре резцедержатель – направляющая обоих резцов.

Отсюда получаем:

$$\begin{aligned} P_{y1} - f_n \cdot R_{21} - f_n \cdot R_{11} &= F_1; \\ P_{y2} + f_n \cdot R_{22} + f_n \cdot R_{12} &= F_2. \end{aligned} \quad (5)$$

Значения реакций опор:

$$\begin{aligned} R_{11} &= \frac{P_{y1} \cdot l_p - P_{x1} \cdot z}{l}; \\ R_{12} &= \frac{P_{y2} \cdot l_p - P_{x2} \cdot z}{l}; \\ R_{21} &= \frac{P_{x1} \cdot (l - z) - P_{y1} \cdot l_p}{l}; \\ R_{22} &= \frac{P_{x2} \cdot (l - z) - P_{y2} \cdot l_p}{l}. \end{aligned} \quad (6)$$

Силы, действующие на поршни соответственно равны:

$$F_1 = \frac{P_1 \cdot \pi \cdot (D_{1л} - d_{1ш})^2}{4} - c_{1н} \cdot \delta_1 + c_{11н} \delta_{11}; \quad (7)$$

$$F_2 = \frac{P_1 \cdot \pi \cdot (D_{2П} - d_{2ш})^2}{4} - c_{2n} \cdot \delta_2 + c_{22n} \cdot \delta_{22}, \quad (8)$$

где D_n – диаметр поршня; c_n – коэффициент жесткости пружин; $d_{ш}$ – диаметр штока; δ – начальное значение деформации пружин.

После преобразований система уравнений (5) при $k_{p1} > k_{p2}$ будет иметь вид:

$$\begin{aligned} a_c k_{p1} [\mu_{mp} \cos \varphi (1 - f_n \operatorname{tg} \varphi - \frac{f_n l_p}{l} + \frac{f_n \operatorname{tg} \varphi z}{l} + \frac{f_n l_p}{l} - \frac{f_n \operatorname{tg} \varphi z}{l})] = \\ = \frac{P_1 \cdot \pi \cdot (D_{1П} - d_{1ш})^2}{4} - c_{1n} \cdot \delta_1 + c_{11n} \delta_{11} \delta_{11} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} a_c k_{p2} [\mu_{mp} \cos \varphi (1 + f_n \operatorname{tg} \varphi + \frac{f_n l_p}{l} - \frac{f_n \operatorname{tg} \varphi z}{l} - \frac{f_n l_p}{l} + \frac{f_n \operatorname{tg} \varphi z}{l})] = \\ = \frac{P_1 \cdot \pi \cdot (D_{2П} - d_{2ш})^2}{4} - c_{2n} \cdot \delta_2 + c_{22n} \cdot \delta_{22} \end{aligned} \quad (9)$$

Разделив уравнение (8) на (9) находим коэффициент точности срабатывания с учетом сил трения:

$$\gamma_{cp} = \frac{P_{z1}}{P_{z2}} \cdot \frac{1 + f_n \operatorname{tg} \varphi}{1 - f_n \operatorname{tg} \varphi}. \quad (10)$$

Анализируя зависимость (10) приходим к выводу, что точность срабатывания внутренней АСУ зависит от коэффициентов трения f_n .

Вывод. В результате анализа характера действия сил трения в прямоугольных направляющих установлено, что точность срабатывания АСУ токарного станка с прямоугольными направляющими для восстановления тормозных дисков в значительной степени определяется коэффициентами трения в направляющих резцедержателей.

Список использованных источников: 1. Подураев В.Н. Автоматически регулируемые и комбинированные процессы резания / В.Н.Подураев. – М.: Машиностроение, 1977. – 303 с. 2. Пуш В.Э. Конструирование металлорежущих станков / В.Э. Пуш. – М.: Машиностроение, 1977. – 390с. 3. Плотников А.Л. Обеспечение надежности определения режимов лезвийной обработки для автоматизированного станочного оборудования на основе оперативной информации о свойствах инструмента и детали: автореф. дис. на соискание научн. степени доктора техн. наук: спец. 05.02.07 «Технология и оборудование физико - механической обработки»/ А.Л. Плотников – Саратов, 2001. – 31 с. 4. Луців І.В. Основи створення багатолезового оснащення з міжінструментальними зв'язками для обробки поверхонь обертання: дис. ... доктора техн. наук: 05.03.01 / Луців Ігор Володимирович.– Тернопіль, 2006. – 448 с.

А.С. ВЕРЕЩАКА, д-р техн. наук, *А.А. ВЕРЕЩАКА*, Москва, Россия

НЕКОТОРЫЕ МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ СОЗДАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

У статті представлені методологічні принципи створення функціональних покриттів для різального інструменту. Розроблена високоміцна композиційна кераміка з наноструктурованим покриттям дозволяє підвищити стійкість різального інструменту до 2-3 разів у порівнянні зі стійкістю інструмента стандартного типу.

В статье представлены методологические принципы создания функциональных покрытий для режущего инструмента. Разработанная высокопрочная композиционная керамика с наноструктурированным покрытием позволяет повысить стойкость режущего инструмента до 2-3 раз по сравнению со стойкостью инструмента стандартного типа.

Some questions of creation methodology of functional coatings for an cutting tools are observed. On the basis of the coating concept as intermediate technological medium between the working and cutting tool materials it is proved application of the multilayer architecture of a coating and the basic demands to its elements are formulated. The basic requirements to elements of the multilayer coating are formulated and the technique of sampling for coating compositions, structure and properties for various machining conditions is presented. Instances of implementation of the developed scientific positions are shown.

Введение

Совершенствование инструментальных материалов на основе традиционных методов производства достигло определенного предела, и дальнейший прогресс в этом направлении возможен только при разработке композиционных материалов интегрирующих свойства компонентов входящих в их состав.

В 70-80 годы XX века были разработаны методология, оборудование, процессы и технологии синтеза покрытий различного состава и функционального назначения, что позволило освоить производство композиционных инструментальных материалов, включающих в качестве субстрата инструментальный материал и поверхностное износостойкое покрытие. Инструменты из композиционных материалов нашли самое широкое применение в металлообрабатывающих производствах и позволили решить гамму технологических задач по повышению

производительности обработки, износостойкости и надежности инструмента, получению высоких качественно-точных характеристик обработанных деталей, расширению областей технологического применения инструментов с ограниченной прочностью субстрата.

Несмотря на достигнутые успехи, режущие инструменты остаются наиболее слабым звеном технологических систем резания. В этой связи дальнейшие поиски по совершенствованию композиционных инструментальных материалов на основе разработки ультрадисперсных субстратов наиболее адаптированных к условиям нанесения покрытий и эксплуатации композитов, поиска новых составов, структуры, архитектуры и свойств покрытий, совершенствованию методов, процессов и оборудования для их получения, является важной частью создаваемых высокоэффективных систем резания [1-7].

В настоящей работе рассмотрены современные тенденции совершенствования покрытий для режущего инструмента из различных инструментальных материалов, а также методология создания функциональных наноструктурированных покрытий на основе многослойной архитектуры при использовании модифицированных процессов вакуумно-дугового синтеза.

1. Тенденции совершенствования покрытий для режущего инструмента

Функции покрытия. Анализ функциональной роли покрытия на контактных площадках режущего инструмента (рис.1) позволяет рассматривать покрытие, как некоторую «промежуточную технологическую среду» (ПТС) между инструментальным и обрабатываемым материалами имеющую двойственную природу. С одной стороны, покрытие повышает такие важные свойства инструментального материала как твердость, теплостойкость, износостойкость, физико-химическая пассивность по отношению к обрабатываемому материалу, износостойкость, с другой - благоприятно влияет на контактные процессы и параметры резания, определяющие изнашивание инструмента.

Анализ систематизированных требований к покрытию [3-5] позволяет отметить, что монослойные покрытия не удовлетворяют функциональным требованиям к покрытиям для режущего инструмента. При разработке композиционных инструментальных материалов наиболее перспективной является концепция многослойной архитектуры покрытия, которая позволит разрешить совокупность противоречивых функций композиционного материала, связанных с необходимостью обеспечения достаточной прочной адгезии на границах «покрытие - инструментальный материал» при одновременном обеспечения максимальной физико-

химической пассивности на границах «покрытие – обрабатываемый материал». Многослойное покрытие, как важный компонент композиционного инструментального материала, позволяет обеспечивать гамму чрезвычайно важных функций связанных с: - повышением сопротивляемости композита усталостному разрушению при воздействии циклических термомеханических напряжений, приводящих к формированию и развитию усталостных трещин; - формированием надлежащих по уровню и знаку остаточных напряжений; - торможением или блокировкой тепловых потоков от фрикционных источников тепла в инструмент и обрабатываемую поверхность, а также интердиффузии между инструментальным и обрабатываемым материалами и т.д.[1-7].

Теоретические предпосылки. Одним из наиболее эффективных методов направленного изменения свойств покрытия для повышения работоспособности инструмента является упрочнение материала покрытия за счет использования твердого раствора дополнительных (легирующих) элементов. Для упрочнения можно использовать элементы для твердорастворного упрочнения с неограниченной или ограниченной растворимостью.

Степень упрочнения твердого раствора для варианта полного растворения упрочняющего элемента можно оценить выражением [10]:

$$\Delta\sigma = \sigma_a^{3/4} \cdot C, \quad (1)$$

где $\sigma_a = (1/a) \cdot da/dC$ – параметр линейной несовместимости, Па; a - период решетки, м; C - концентрация растворимых атомов, % масс. (% ат.).

Обычно прочность материала оценивается уровнем предела текучести. Однако при анализе механизма упрочнения необходимо оценивать не только зависимость «предел текучести – микроструктура», но и зависимость «вязкость разрушения – микроструктура» [21]. В этой связи оценка результатов влияния структуры на работоспособность инструмента с покрытием следует оценивать исходя из сбалансированности величин предела текучести σ_T и коэффициента вязкости разрушения K_{IC} , характеризующего хрупкость материала.

В соответствии с дислокационной теорией пластическая деформация и разрушение являются функцией следующих параметров [24]:

$$\sigma_T, K_{IC} = f(\sigma_n, \sigma_d, \sigma_p, \sigma_f, \sigma_z), \quad (2)$$

где σ_n – напряжение Пайперса-Набарро (напряжение трения кристаллической решетки); σ_d – упрочнение увеличением числа дефектов решетки (вакансий, дислокаций); σ_p – упрочнение растворенными

атомами; σ_ϕ – упрочнение дисперсионными фазами, имеющимися или специально созданными в структуре покрытия; σ_3 – упрочнение микроструктурными барьерами на пути движения дислокаций в виде границ зерен, границ двух фаз, узких прослоек второй фазы.

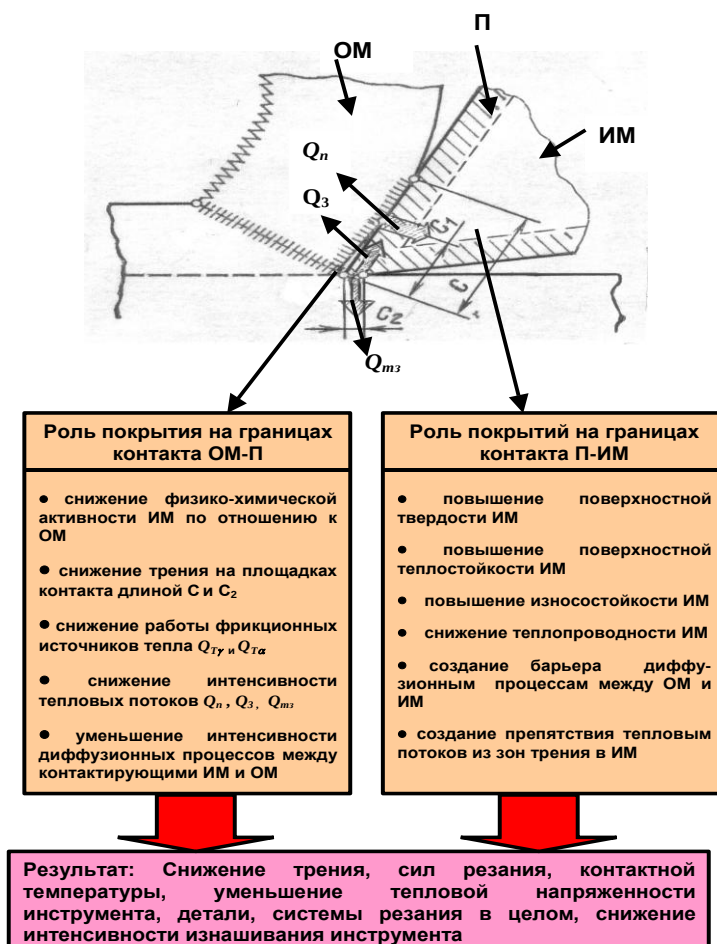


Рисунок 1 – Схема технологической системы резания, уясняющая двойственную природу покрытия как промежуточной технологической среды (ПТС) между инструментальным и обрабатываемым материалами:

Q_n , Q_3 , Q_{mz} – тепловые потоки в инструмент и деталь от фрикционных источников тепла; C_1 и C_2 – длины контакта по передней и задней поверхностям инструмента. **ИМ** – инструментальный материал; **ОМ** – обрабатываемый материал; **П** – покрытие.

Краткий анализ выражений (1, 2) позволяет отметить следующее. Повышение напряжения трения решетки матрицы σ_n может привести к росту σ_T при одновременном снижении критического напряжения разрушения. Напряжение σ_n сильно зависит от типа связи и увеличивается с усилением доли ковалентности в межатомной связи. Торможение дислокаций рельефом Пайперса более эффективно при снижении

температуры, что необходимо учитывать при оценке влияния параметра σ_n на прочность покрытий. В этой связи, наиболее перспективным направлением повышения свойств материала покрытия является создание в структуре материала дисперсионных упрочняющих фаз (параметр σ_ϕ) и условий формирования зерен нанодисперсного размера в многофазной структуре материала покрытия (параметр σ_z).

На основе концепции двойственной природы **ПТС** были систематизированы функциональные требования к покрытиям для режущего инструмента и обоснована концепция применения многослойно-композиционных покрытий (**МКП**) [4-6].

В соответствии с принятой концепцией архитектуру **МКП** целесообразней всего базировать на основе трехэлементной системы, включающей *адгезионный подслой 3, промежуточный слой 2 и износостойкий слой 1* (рис.2).



Рисунок 2 – Систематизация основных требований к слоям **МКП**, исходя из его двойственной природы: 1 – наружный (износостойкий) слой; 2 – промежуточный (барьерный) слой; 3 – адгезионный подслой; 4 – субстрат (инструментальный материал); **ИК** - износостойкий комплекс.

Адгезионный подслой 3 должен иметь максимальную кристаллохимическую совместимость и обеспечивать прочную адгезию с материалом субстрата (адгезионные функции). *Переходный слой 2* должен сглаживать различие кристаллохимических свойств слоев 1 и 3, и, кроме того, блокировать тепловые потоки от фрикционных источников тепла в субстрат и интердиффузию между инструментальным и обрабатываемым материалами (барьерные функции). *Износостойкий слой 1* должен иметь минимальную совместимость кристаллохимических свойств с материалом субстрата, повышенную твердость относительно обрабатываемого материала, максимальную сопротивляемость макро- и микро разрушению (изнашиванию) при термомеханических напряжениях, возникающих при резании. Каждый из слоев **МКП** может иметь многослойную структуру, что повышает его сопротивляемость хрупкому разрушению.

В настоящее время ведущие производители режущего инструмента разработали износостойкие покрытия многослойно-композиционного типа пятого поколения, каждый слой которого имеет строго функциональное назначение. Некоторые из предлагаемых покрытий последнего поколения, разработанные ведущими производителями твердосплавных пластин, представлены в *таблице 1*.

Разработку **МПК** для режущего инструмента обычно производят при использовании следующих концептуальных подходов: - на основе упрочняющих твердых растворов; - при применении слоев градуированных по типам связи; - путем применения метастабильных систем с гомогенной металлоидной структурой; - на основе наноструктурированных многофазных слоев; - на основе супермногослойных структур со слоями наноразмерной толщины [1-7,22].

Анализ отечественных и зарубежных исследований, относящихся к проблемам создания инструмента с покрытием последнего поколения, позволяет отметить ограниченное применение монослойных систем (типа TiC, TiN, TiCN) и широкое применение многослойно-композиционных систем: - двухэлементных {Ti-TiN-(Ti,Al)N, Ti-(Ti,Cr)N, Zr-(Ti,Zr)N, TiN-(Ti,Nb), TiCN-Al₂O₃-TiN и др} [1-7,21,22]; - трехэлементных {Ti-TiN-(Ti,Cr,Al)N, (Ti,Al,V)N, (Ti,Zr,Cr)N, (Al,Ti,Cr)NO, (Ti,Al,Si)N и др.} [3-5,8-16] нитридов, оксинитридов, карбидов и карбонитридов 4-6 групп Периодической системы элементов, легированных алюминием (Al) и кремнием (Si) [6-7,14-17,22]. Ограниченное применение получили также покрытия, включающих слои на основе алмазо-подобного аморфного графита (DLC, α-WC:H) [1].

Таблица 1 – Составы и архитектура сложнокомпозиционных покрытий последнего поколения

Архитектура и состав покрытия	Область применения	Разработчик					
<table><tr><td>TiN</td></tr><tr><td>Al₂O₃</td></tr><tr><td>TiCN</td></tr><tr><td>Carbide</td></tr></table>	TiN	Al ₂ O ₃	TiCN	Carbide	Точение стали P01-P20 с v=200-350 м/мин Точение стали P10-P20 с v=200-300 м/мин Точение стали P20-P30 с v=100-200 м/мин Точение стали P30-P40 с v= 100-200 м/мин Точение чугуна, в том числе с ЧШГ K10-K20 с v=150-300 м/мин Точение нержавеющей стали M10-M20 с v=130-250 м/мин Фрезерование стали P01-P20 с v=150-250 м/мин Фрезерование чугуна K01-K20 с v=150-250 м/мин	Mitsubishi Carbide Japan	
TiN							
Al ₂ O ₃							
TiCN							
Carbide							
<table><tr><td>TiN (MT CVD)</td></tr><tr><td>TiN/Al₂O₃</td></tr><tr><td>TiCN</td></tr><tr><td>Carbide</td></tr></table>	TiN (MT CVD)	TiN/Al ₂ O ₃	TiCN	Carbide	Точение высоколегированных жаростойких, коррозионностойких и нержавеющей сталей M10-M30	Sandvik Coromant Sweden	
TiN (MT CVD)							
TiN/Al ₂ O ₃							
TiCN							
Carbide							
<table><tr><td>TiN</td></tr><tr><td>Al₂O₃</td></tr><tr><td>TiC</td></tr><tr><td>TiCN</td></tr><tr><td>Carbide</td></tr></table>	TiN	Al ₂ O ₃	TiC	TiCN	Carbide	Точение чугуна (в том числе ЧШГ) K01-K10 с v=200-375 м/мин Точение чугуна K20-K30 с v=160-300 м/мин Точение конструкционных P30-P40 и нержавеющей M20-M30 сталей	Kennametal-Hertel USA-Germany
TiN							
Al ₂ O ₃							
TiC							
TiCN							
Carbide							
<table><tr><td>TiN</td></tr><tr><td>TiCN</td></tr><tr><td>TiC</td></tr><tr><td>Carbide</td></tr></table>	TiN	TiCN	TiC	Carbide	Точение высоколегированных сталей аустенитного класса M20-M30 Фрезерование конструкционных P10-P30 и нержавеющей M10-M30 сталей	Kennametal-Hertel USA-Germany	
TiN							
TiCN							
TiC							
Carbide							
<table><tr><td>TiN</td></tr><tr><td>Al₂O₃</td></tr><tr><td>TiC</td></tr><tr><td>TiCN</td></tr><tr><td>Carbide</td></tr></table>	TiN	Al ₂ O ₃	TiC	TiCN	Carbide	Точение стали P01-P10 Точение стали P10-P30 Точение конструкционной P01-P10 и нержавеющей M10-M30 сталей Точение нержавеющей стали M10-M30 Точение чугуна K01-K10 Точение чугуна K10-K20 Фрезерование конструкционной P20-P30 и нержавеющей M20-M30 сталей Фрезерование стали P20-P35 Фрезерование чугуна K01-K10 Фрезерование чугуна K20-K30	Karloy S.Korea
TiN							
Al ₂ O ₃							
TiC							
TiCN							
Carbide							

Покрyтия с нанокристаллической структурой. Производители режущих инструментов с **МКП** последнего поколения разработали гамму покрытий с нанокристаллической структурой, имеющих повышенные эксплуатационные характеристики [3,5,8,11,13,18,20,22]. Рассмотрим более подробно некоторые особенности наноструктурированных **МКП**.

В настоящее время **МКП**, используемые для нанесения на режущие инструменты, можно классифицировать по кристаллической структуре на три основные группы: - макрометрические (10-1,5... 103,5) мм; - микрометрические (10-4,8... 10-6,8) мм; - нанометрические (10-7,8...10-9,7) мм.

Известно, что первопричиной разрушения материалов, имеющих стандартную структуру с размерами зерен свыше $d > 1$ мкм, является формирование трещин, возникающих вследствие концентрации дислокаций у различных дефектов [10]. В наноструктурированных материалах с размерами зерен менее $d < 80...100$ нм превалирующей причиной разрушения являются процессы на межзеренных границах, что связано с меньшим или сравнимым количеством атомов в зернах по сравнению с их количеством на их границах [8,13,18,19]. Упрочненные межзеренные границы трансформируют взаимодействие между зернами, так как тормозится движение и генерация дислокаций, а также движение трещин. Дислокации в наноразмерных зернах практически не возникают из-за полного торможения на границах зерен, а сами границы начинают выполнять решающую роль в деформировании и разрушению материала. Появляется возможность формирования уникальных свойств у нанокристаллических материалов, а при размерах зерен с $d < 5...10$ нм можно прогнозировать создание субатомных нанокристаллических структур и соответствующих направленных изменений свойств материалов [13,18].

Особые свойства наноструктурированных покрытий можно прокомментировать, используя зависимость Холла-Печа [18,19], которая устанавливает связь между пределом текучести σ_y и размером зерна d

$$\sigma_y = \sigma_0 + k(d)^{1/2} \quad (3)$$

Зависимость (3), сформулированная вначале экспериментально, следует также из дислокационной теории ползучести. Так как границы зерен являются надежным стопором для дислокаций, то прочность материалов растет с уменьшением размера зерен (см. зависимость 3), а при уменьшении их размера от 1 мм до 100 нм твердость возрастает в 100 раз. С другой стороны, при уменьшении размера зерен d растет скорость зернограницной ползучести [19]:

$$d\varepsilon/dt = (\sigma/d^3) \cdot Q_{Coble} \cdot \exp(-Q_{Coble}/T) \quad (4)$$

где $d\varepsilon/dt$ – скорость деформации, σ – приложенное напряжение, D_{gb} – коэффициент диффузии по границам зерен, Q_{Coble} – энергия активации зерно-границной ползучести, T – температура.

В соответствии с (1,2) при очень малых размерах зерен материал становится пластичным. Это накладывает определенные ограничения на уменьшение размера зерен с целью достижения максимальной твердости. Согласно положениям работы [19], граничная ползучесть начинает преобладать над дислокационной ползучестью при размерах зерен меньше 10-15 нм, а это означает, что увеличение твердости материала возможно при предельном уменьшении размеров зерна до этих величин. Таким образом, при использовании покрытий с нанозерновой структурой для режущего инструмента можно уверенно прогнозировать сбалансированность высокой твердости и износостойкости покрытия в сочетании с достаточной трещиностойкостью и сопротивляемостью усталостному разрушению. При этом, следует учитывать, что для покрытий из высокотвердых соединений тугоплавких металлов одни и те же механизмы могут привести как к повышению вязкости и прочности, (материалы с плотноупакованными кубическими решетками), так и ее снижению (материалы с гексагональными решетками).

Наноструктурированные МКП классифицируют на три группы (рис.3): 1 – состоящие из слоев с одинаковыми химическими связями и структурой; 2 – содержащие слои с сильным отличием химических связей и структуры; 3 – имеющие слои с внутренними граничными промежуточными подслоями нанометрической толщины.

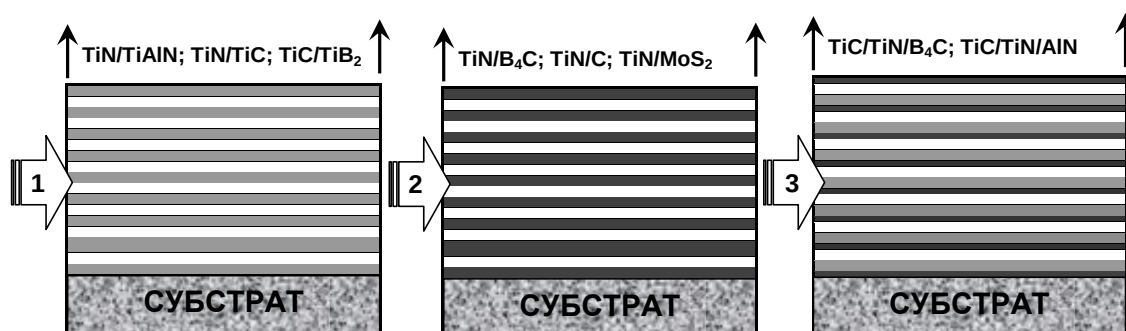


Рисунок 3 – Классификация многослойно - композиционных наноструктурированных покрытий по архитектуре:

- 1 – со слоями с одинаковыми химическими связями;
- 2 – из материалов с сильным отличием химических связей и структуры;
- 3 – с внутренними подслоями нанометрической толщины [1].

МКП, имеющие слои с одинаковым характером химических связей, наиболее широко применяют для нанесения на режущие и штамповые инструменты. Чаще всего в подобных покрытиях комбинируют слои из нитридов, карбидов, карбонитридов и боридов переходных тугоплавких металлов IV – VI групп Периодической таблицы, легированных алюминием [1- 4] .

МКП с наномоделированной структурой. Слоистая архитектура покрытий со слоями наноразмерной толщины позволяет фиксировать определенную текстуру каждого слоя покрытия и создавать материалы для покрытий нового типа. Примером подобного «конструирования» покрытия могут служить **МКП** на основе TiC/TiB₂, для которых наблюдают рост плоскостей с текстурой (III) TiC на плоскостях с текстурой (001) TiB₂ [1, 3, 7].

Минимизация энергии граничных поверхностей является еще одним направлением создания материалов для покрытий нового поколения [20]. Например, для **МКП** на основе многослойных композиций TiN-AlN и TiC-SiC наблюдается стабилизация кубической гранецентрированной решетки слоев AlN и SiC в многослойной архитектуре покрытий соответственно TiN/AlN и TiC/SiC. Отмеченный эффект стабилизации структуры возможен только для **МКП** с толщиной слоев менее 80 нм, а подобная архитектура **МКП** создает большие перспективы для создания материалов для покрытий нового типа. В этой связи можно прогнозировать стабилизацию решетки соединения C₃N₄ посредством ее встраивания в слоистую структуру решетки Si₃N₄. Твердость такого соединения теоретически должна быть больше, чем у алмаза [7,20].

Многослойные покрытия с супер-решетчатой структурой (Superlattice). Еще одним перспективным направлением совершенствования покрытий является разработка «супер-решетчатой» структуры покрытия. В существующей литературе очень часто не проводят четкого разделения между многослойными покрытиями с наноразмерной толщиной слоев и супер-решетчатыми покрытиями [7,18,20]. Необходимо различать монокристаллические и поликристаллические супер-решетчатые покрытия. В обоих случаях речь идет о защитных покрытиях с экстремальными значениями некоторых свойств, что предопределяет перспективность их применения для режущего инструмента.

Необходимо отметить, что не все типы супер решетчатых покрытий могут иметь высокие значения основных свойств. Например, комбинации TiC/TiN, TiC/TiN и TiN/TiAlN синтезировали с толщиной слоя в диапазоне 1-500 нм. Максимальная твердость покрытия была получена для варианта

с многослойной архитектурой, имеющего 100 до 200 слоев при общей толщине покрытия 5 мкм, что соответствует толщине слоя от 25 до 50 нм. Эффекты супер-решетчатой структуры проявляются также при изменении и других параметров, например модуля упругости отдельных слоев покрытия. В настоящее время основные модели, устанавливающие механизмы связи параметров супер-решетки с особыми свойствами покрытий строятся на положении, согласно которому изменение свойств связано с ограничением перемещения дислокаций на граничных поверхностях. Однако, следует признать, что эти модели являются дискуссионными и носят гипотетический характер.

2. Разработка наноструктурированных многослойно-композиционных покрытий

Выбор состава слоев МКП. Для выбора состава слоев *МКП* необходим использование модели изнашивания режущего инструмента. Для указанной цели было принято ключевое положение о том, что преобладающим механизмом изнашивания режущего инструмента в широком диапазоне изменения условий обработки является адгезионно-усталостное изнашивание. В соответствии с таким подходом минимизация уровня изнашивания инструмента достигается при минимуме теряемой массы инструментального материала $Ma \rightarrow \min$:

$$Ma = K_a \cdot \rho \cdot F_a (J \cdot \sigma_a / \sigma_p), \quad (5)$$

где K_a – коэффициент адгезии (объемный); ρ – плотность инструментального материала; J – интенсивность схватывания; σ_a – прочность связей в узлах схватывания; σ_p – сопротивляемость инструментального материала разрушению. Интенсивность схватывания можно оценить, используя зависимость:

$$J = (N_T + N_M) F_a. \quad (6)$$

где F_a – номинальная площадь контакта; N_T, N_M – число активных центров на единицу площади контакта, соответственно при термическом и механическом активировании. Величину N_T можно оценить по формуле

$$N_T = \nu \cdot T \cdot e^{-Q_t/K\theta} \quad (7)$$

где ν – частота собственных валентных колебаний атомов; T – время; Q_t – энергия термической активации; K – постоянная Больцмана; θ – абсолютная температура. Величину N_M можно также установить при использовании следующей зависимости:

$$N_M = \rho_1 \cdot S \cdot b, \quad (8)$$

где ρ_1 - плотность дислокаций; S - средняя длина пробега дислокации; b - вектор Бюргерса.

Скорость движения дислокаций можно оценить по формуле:

$$V_D = S \cdot \tau^n \quad (9)$$

где τ - напряжение; n – показатель степени, зависящий от твердости материала.

По формулам (5) – (9) можно качественно оценить влияние различных факторов на склонность покрытия и обрабатываемого материала к адгезии. Эта склонность будет возрастать при следующих условиях: - при увеличении температуры (до момента начала интенсивного окисления и термического разупрочнения «мостиков адгезии»); - при увеличении частоты собственных колебаний валентных атомов, которая коррелирует со статистическим весом атомов наиболее стабильных электронных конфигураций (СВАСК); - при росте подвижности дислокаций V_D , которая обратно пропорциональна твердости инструментального материала (покрытия).

Термическую составляющую схватывания можно оценить по температуре плавления вещества (соединения):

$$N_T = C \cdot T^{\theta/\theta_{пл}} \quad (10)$$

где C - постоянная; θ - абсолютная температура; $\theta_{пл}$ - температура плавления вещества.

При оптимальном составе наружного слоя 1 (см. рис. 2) **МКП** достигается соблюдение условия $Ma \rightarrow \min$.

Анализ зависимостей (5-10) позволяет констатировать, что при выборе материала износостойкого слоя многослойно-композиционного покрытия, предпочтение следует отдавать твердым тугоплавким соединениям, содержащим максимальное количества СВАСКов устойчивых конфигураций типа sp^3 (материалы с преимущественно металлическими связями), s^2p^6 (материалы со смешанными типами связей) и d^5 (материалы с ковалентными и ионными связями).

Для качественной оценки составов слоев многослойно-композиционного покрытия была произведена систематизация тугоплавких соединений по видам кристаллохимических связей принципиально пригодных для использования в композиционно-многослойном покрытии (рис.4).

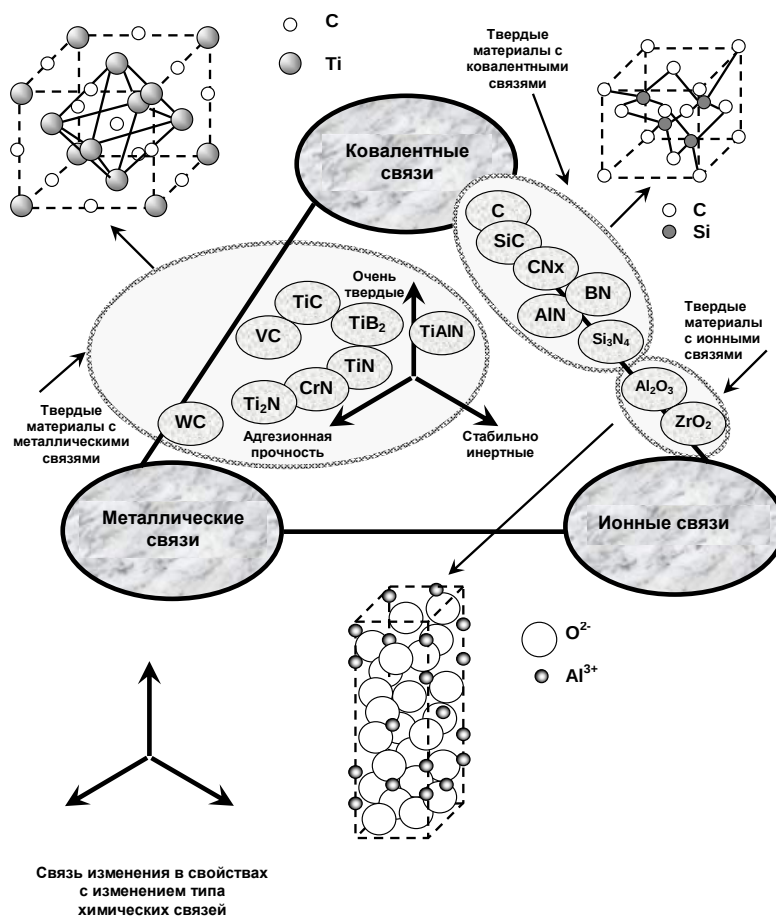


Рисунок 4 – Систематизация тугоплавких соединений наиболее пригодных для использования в качестве слоев многослойно-композиционных покрытий для режущего инструмента по типам связей, кристаллохимическому строению и свойствам

На основе разработанных положение и систематизации соединений наиболее пригодных для формирования слоев **МКП** (см. рис. 4) в таблице 2 представлены некоторые рекомендации по составам слоев **МКП**, предназначенные для нанесения на режущие инструменты для обработки стали и чугунов.

3. Некоторые результаты реализации методологии создания **МКП** для режущего инструмента

Методика исследований. Для формирования **МКП** использовали установку ВИТ-2 разработки МГТУ «СТАНКИН» - НПК «ЭКОТЕК», которая позволяет реализовывать инновационные процессы фильтруемого вакуумно-дугового осаждения (**ФВДО**) [3, 5, 8].

Реализацию методологических положений по формированию **МКП** производили применительно к нескольким типам режущего инструмента –

резцам и торцовым фрезам с механическим креплением СМП, цельнотвердосплавным и быстрорежущим сверлам и концевых фрезам. Микрорентгеноструктурные исследования, состав и морфологию поверхности слоев **МКП** выполняли с помощью электронносканирующего микроскопа JSM 4510 фирмы JEOL и DSM 950 фирмы ZEISS. Макроскопические свойства **МКП**, такие как толщина, твердость, коэффициент трения, прочность адгезии покрытия с основой, определяли стандартными методами. В частности, измерение толщины **МКП** проводили с помощью калотеста и методом обратного β - излучения на приборе Fisherscope MMS компании Helmut Fisher GmbH (ФРГ). При оценке микротвердости покрытий (толщина покрытий 2...5 мкм) использовали нанотестер А-600 фирмы Micro Materials Ltd (Великобритания), который позволяет измерять микротвердость с локальностью до 100 нм.

Таблица 2 – Рекомендации по выбору предпочтительных составов элементов многослойно-композиционных покрытий и основные требования к ним.

	Износостойкий слой «1»	Адгезионный подслой «3»	Промежуточный слой «2»
Рекомендуемые составы	CrN>CrC>CrB>VN>ZrN> ZrC> rB>TiN>TiC>TiB ₂ > HfB ₂ ; Карбиды, итриды, карбо- нитриды, бориды: (Ti,Zr) > (Ti,Cr) >(Ti,Al) >(Zr,Nb) > (Zr,Cr)>(Zr,Al) > (Ti,Nb,Cr) >(Ti,Cr,Al) > (Ti,Zr,Al)	Металлические подслои: Zr > Cr > V > Ti ; Металлические композиты: (Ti,Zr) > (Zr,Cr) >(Ti,Cr) > (Ti,V) Соединения: ZrN > (Ti,Cr)N > TiN > (Ti,V)N	β -C> MoS ₂ > (Mo,Ti)S _x > Me _x (JO ₃) _y > AlN>Al ₂ O ₃ (Ti,Al)N> AlN-CrN
Важнейшие требования	1. $\Delta G_T^\circ > 0$ для пары «слой 1-ОМ» 2. $M_a \rightarrow \min$ 3. Максимальные значения параметров: HV, σ_b , K1C	1. $\Delta G_T^\circ < 0$ для пары «слой 3-субстрат (ИМ)». 2. $\Delta G_T^\circ < 0$ для пары «слоя 3- слой 2», 3. Необходимость соблюдения правила «Юм- Розери» для пар: «слой 3- субстрат (ИМ)», «слой 3 – слой 2»	1. $\Delta G_T^\circ > 0$ для пар «слой 2-ОМ» 2. $\Delta G_T^\circ < 0$ для пар «слой 2- слой 1»; «слой 2 –слой 3» 3. Необходимость соблюдения правила «Юм- Розери» для пар: «слой 2- слой 1»; «слой 2 –слой 3»

* Примечание. ΔG_T° - изобарный потенциал реакции при температуре эксплуатации режущего инструмента; Правило «Юм-Розери» – взаимная растворимость элементов возможна, если размер их атомных диаметров не превышает 15%; TiB₂ > HfB₂ > TiC >..... – предпочтительный ряд соединений для различных слоев **МКП** (по мере возрастания); ИМ, ОМ – соответственно инструментальный и обрабатываемый материалы.

Эффективность **МКП** сравнивали с соответствующими характеристиками инструмента, имеющего стандартные покрытия. Исследования проводили при сухом резании или использовании смазочно-охлаждающих технологических сред (СОТС) при точении, сверлении, фрезеровании сталей и труднообрабатываемых материалов с использованием стандартного станочного оборудования.

Некоторые результаты исследований. Количественный анализ **МКП** на основе Ti-TiN-(Ti,Al)N показал, что соотношение Ti/Al в износостойком слое (Ti,Al)N существенно изменяется при изменении таких параметров процесса **ФВДО**, как – ток дуги при испарении титана **I**, давление азота **p** и напряжение смещения при осаждении покрытия **U**. В частности, изменение **I** от 40 до 80 А приводит к изменению массовой доли Ti в покрытии от 21,3 до 38,3 % при соответствующем изменении массовой доли Al от 44,7 до 33,0 %, что полностью подтверждает положения работ [3,5]. Очевидно, что изменение состава слоев **МКП** оказывает сильное влияние и на режущие свойства инструмента.

Изучено и установлено сильное влияние основных параметров процесса **ФВДО** (**I, p, U**) при формировании износостойкого слоя (Ti,Al)N (слой 1 **МКП**) на его важнейшие характеристики - микротвердость, толщина, прочность адгезии с промежуточным слоем TiN (слой 2 **МКП**). Установлено, что с увеличением **U** изменение микротвердости слоя (Ti,Al)N имеет экстремальный характер, в то время как его толщина уменьшается, а прочность адгезии со слоем TiN возрастает.

Разработку математических моделей процесса **ФВДО** проводили применительно к осаждению **МКП** Ti-TiN-(Ti,Al)N на твердосплавные СМП, предназначенные для чистовой и получистовой обработки сталей и чугунов (области применения (K01-K20, P01-P20). Диапазон варьирования факторов **p, U, I** выбирали таким образом, чтобы разрабатываемая модель была справедлива для всей области управления, а значения варьируемых факторов внутри выбранной области были практически реализуемы. Выбранные диапазоны варьируемых факторов имели следующие значения: $p = 5 \cdot 10^{-2} - 3 \cdot 10^{-1}$ Па, $U = 75 - 200$ В, $I = 40 - 130$ А. Математическая модель, устанавливающая связи между наиболее значимыми параметрами процесса **ФВДО** **I, p, U** и стойкостью инструмента **T**, оснащенного СМП из T14K8 с **МКП** Ti-TiN-TiAlN применительно к продольному точению стали 45 НВ 200 с $t=1,0-4,0$ мм; $S=0,15-0,6$ мм/об и $v=150-350$ м/мин, была использована для процедуры оптимизации процесса **ФВДО** и имела следующий вид:

$$T = 2,39 \cdot I_{Ti}^{-8,60} \cdot p_N^{-3,29} \cdot U_c^{-0,33} \exp(8,26 \cdot 10^{-2} I_{Ti} + 13,7 p_N + 7,88 \cdot 10^{-3} U_c) \quad (11)$$

Проведены широкие исследования структуры, параметров, морфологии и состав слоев *МКП* на основе системы Ti-TiN-TiAlN, результаты которых (таблица 3, рис.5) позволяют отметить следующее.

Износостойкий слой (Ti,Al)N имеет ультрадисперсную структуру с толщиной субслоев порядка 15-25 нм. Среднее значение соотношения Ti и Al в слое (Ti,Al)N составило 2,6. Слой (Ti,Al)N имеет столбчатую структуру, ориентированную перпендикулярно к плоскости подслоя TiN. Толщина субслоев промежуточного TiN-слоя также составляет порядка 25 нм, что позволяет классифицировать многослойно-композиционное покрытие как наноструктурированное.

Структура слоя (Ti,Al)N (рис. 5, а) свидетельствует о наноразмерной толщине субслоев слоя (см. табл.3). Морфология поверхности износостойкого слоя (Ti,Al)N, полученного при использовании стандартной (рис. 5, б) и разработанной (*ФВДО*) (см. рис.5, в) технологий, наглядно демонстрирует существенное улучшение качества поверхностного слоя при практически полном отсутствии микрокапель.

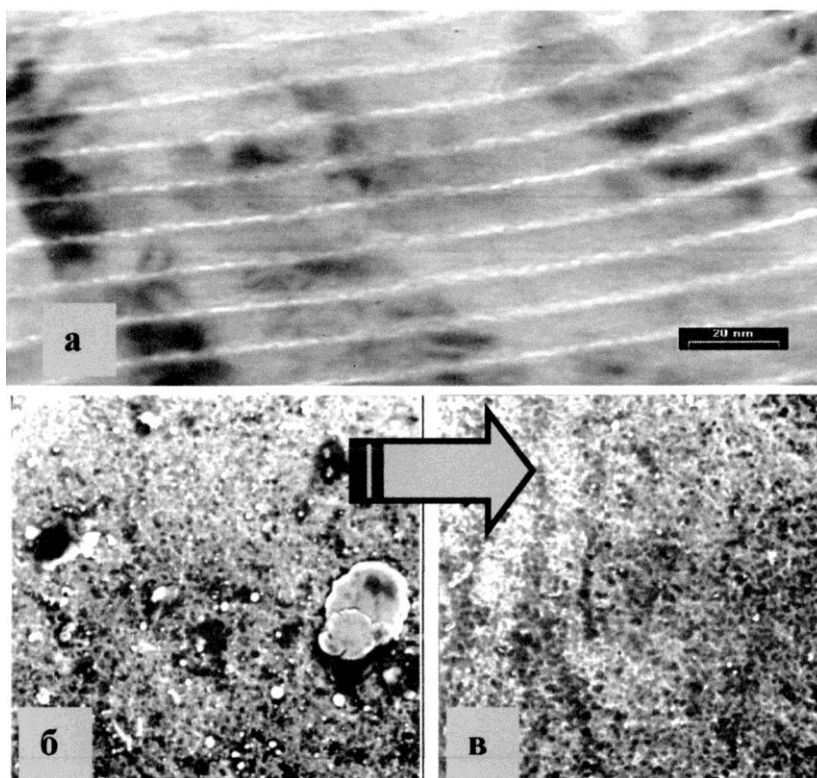


Рисунок 5 – Структура *МКП* (а, $\times 100000$) и морфология его поверхности, полученная при использовании стандартного (б, $\times 3000$) и фильтруемого (в, $\times 3000$) вакуумно-дуговых процессов КИБ-MeVVA.

Таблица 3 – Архитектура и параметры **МКП** на основе системы Ti-TiN-TiAlN

Архитектура элементов многослойно-композиционного покрытия Ti-TiN-(Ti,Al)N	Состав, %, толщина	Микротвердость*	Прочность адгезии МКП **, $R_{\text{крит}}$, Н
Адгезионный подслои Ti (монослойный)	$h_a = 0,1$ мкм	-	120
Износостойкий слой TiAlN (многослойный)	50%Ti-50%Al; $h_u = 2,0$ мкм $h_c = 25$ нм	3200	
Промежуточный слой TiN (многослойный)	$h_n = 1,8$ мкм $h_c = 15$ нм	-	

h_a – толщина адгезионного подслоя; h_u, h_n – толщина износостойкого и промежуточного слоев; h_c – толщина субслоев износостойкого и промежуточного слоев; * – значение микротвердости получено на наноиндентометре с поверхности образца; ** – $R_{\text{крит}}$ – критическое значению усилия, прилагаемого к скрайбирующему (царапывающему) индентору, при котором происходит разрушение **МКП** вдоль царапины.

Разработанную методологию формирования МКП использовали и для получения составов МКП для вариантов чистового, получистового и тяжелого резания широкой гаммы обрабатываемых материалов.

Для оценки режущих свойств различных типов инструмента с разработанными МКП были проведены широкие лабораторные и промышленные исследования различных типов режущего инструмента с разработанными покрытиями.

На рис.6, а,б приведены данные сравнительных исследований стойкостных свойств торцовых фрез, оснащенных СМП из сплава ВК6 без покрытия (кривые 1), со стандартным МКП (Zr,Cr)N (кривые 2) и с разработанными МКП (Ti,Zr)-ZrN-(Zr,Cr)N (кривые 3), при сухом симметричном фрезеровании деформируемого двухфазного ($\alpha+\beta$) титанового сплава ВТ-14 при изменении скорости резания $v=50-110$ м/мин и подачи $S=0,1-0,25$ мм/об. Полученные данные позволяют отметить, что СМП с разработанными МКП заметно превышают по стойкости СМП без покрытия (в 1,8-2,4 раза) и СМП со стандартными МКП (1,5-1,7 раза) для достаточно широкого диапазона изменения скорости резания и подачи, причем с ростом скорости резания и подачи отмеченный эффект возрастает (см. рис.6, а, б).

Разработанные МКП показали высокую эффективность при продольном точении стали 45, и труднообрабатываемых сплавов ХН77ТЮР и ВТ-14, которые обеспечивали повышение времени наработки инструмента на отказ до 3...5 раз при точении конструкционной стали 45 и до 1,5-3 раз при точении сплавов ВТ-14 и ХН77ТЮР по сравнению со

стойкостью инструмента со стандартными типами покрытий, рекомендуемых для указанных целей.

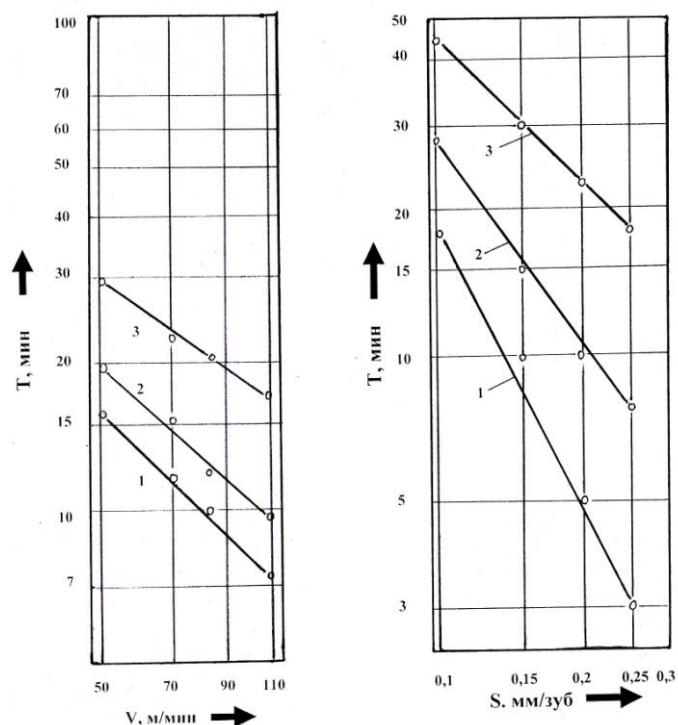


Рисунок 6 – Влияние скорости резания v (а, $t = 1,0$; $SZ = 0,2$ мм/зуб; $B = 40$ мм) и подачи S (б, $t = 1,0$; $v = 100$ м/мин; $B = 40$ мм) на стойкость торцевых фрез, оснащенных СМП из сплава ВК6 ($Z = 1$; $D_{фр} = 128$ мм) с различными покрытиями при сухом фрезеровании (симметричном) титанового сплава ВТ-14: 1 – контрольные СМП из сплава ВК6 без покрытия; 2 – СМП из сплава ВК6 со стандартным МКП (Zr,Cr)N; 3 – СМП из сплава ВК6 с разработанным МКП (Ti,Zr)-ZrN-(Zr,Cr)N, полученным при использовании процесса ФВДО.

Результаты исследований режущих свойств цельнотвердосплавных сверл и концевых фрез с разработанными составами **МКП** при обработке стали 40Х также свидетельствуют об их существенном преимуществе по сравнению со сложнопрофильным инструментом без покрытия. В частности, зафиксировано повышение времени наработки на отказ сверл (до 5 раз) и концевых фрез (2-3 раза) по сравнению с аналогичным показателем для инструмента без покрытия.

Результаты статистической обработки данных сравнительных промышленных испытаний резцов, оснащенных СМП форм LNMХ и RPUX со стандартными **мкп** ведущих производителей и СМП из сплава Т14К8 с разработанным **мкп** при восстановительной обточке катального профиля колесных пар в особо тяжелых условиях с $v = 50$ м/мин $S = 1,2$ мм/об $t = 6,0$ мм представлен в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты сравнительных испытаний СМП для обточки колесных пар.

Производитель	Архитектура <i>МКП</i>	Толщина покрытия, $h_{\text{П}}$, мкм	Средняя стойкость, $T_{\text{П}}$, мин	Коэффициент вариации стойкости, ν	Коэффициент стойкости $K_{\text{ст}} =$ $(T_{\text{П}}/T)^{***}$
Производитель № 1	TiN-TiCN- TiN*	9,0	45,6	0,448	1,18
Производитель №2	TiCN-Al ₂ O ₃ - TiN*	10,0	26,4	0,452	1,05
Производитель №3	TiC-TiCN- TiN*	10,0	25,0	0,46	0,64
СМП с <i>МКП</i> МГТУ «СТАНКИН»**	Ti-TiAlN-TiN	4,0	88,1	0,355	2,19

*Покрытие получено методом HTCVD; ** Разработанное наноструктурированное *МКП*, синтезируемое с использованием процессов *ФВДО*; *** $T_{\text{П}}$ – среднее значение стойкости инструмента с покрытием; T – среднее значение стойкости контрольного инструмента без покрытия.

Анализ данных таблицы 4 позволяет отметить достаточно высокую эффективность СМП форм LNMХ и RPUX из твердого сплава Т14К8 с разработанным *МКП* по сравнению с лучшими зарубежными аналогами при тяжелой восстановительной обточке катальной поверхности колесных пар подвижного состава ЖД. В частности, для СМП с разработанными *МКП* отмечено не только более высокое среднее значение стойкости (88,1 мин) и коэффициента стойкости $K_{\text{ст}}$ (2,19), но и снижение коэффициента вариации стойкости ($\nu = 0,355$).

Применение разработанных МКП для сухого высокоскоростного резания. Высокий уровень загрязненности окружающей среды при использовании технологических процессов обработки резанием с жидкими СОТС (до 30% техногенной загрязненности) является главной причиной все более широкого использования сухого резания [25,26,27]. С учетом повышенной термомеханической напряженности всех элементов системы сухого резания и, особенно режущего инструмента, разработана концепция инструментального материала для систем сухого резания с повышенными физико-механическими, теплофизическими и режущими свойствами на основе композиционно-слоистой системы состоящей из трех основных элементов с градиентом свойств в объеме геометрического тела инструмента [28]. В таком композите оптимально сочетали свойства твердого сплава (достаточная прочность и вязкость), режущей керамики (высокая твердость теплостойкость и износостойкость) и

наноструктурированного покрытия (благоприятная трансформация контактных процессов при резании, «залечивание» поверхностных дефектов керамики). Подобный композиционный материал получил наименование «высокопрочная композиционная керамика» (ВКК) с покрытием (рис.7) [.

На рис.7. показана архитектура высокопрочного керамического трехслойного композита.

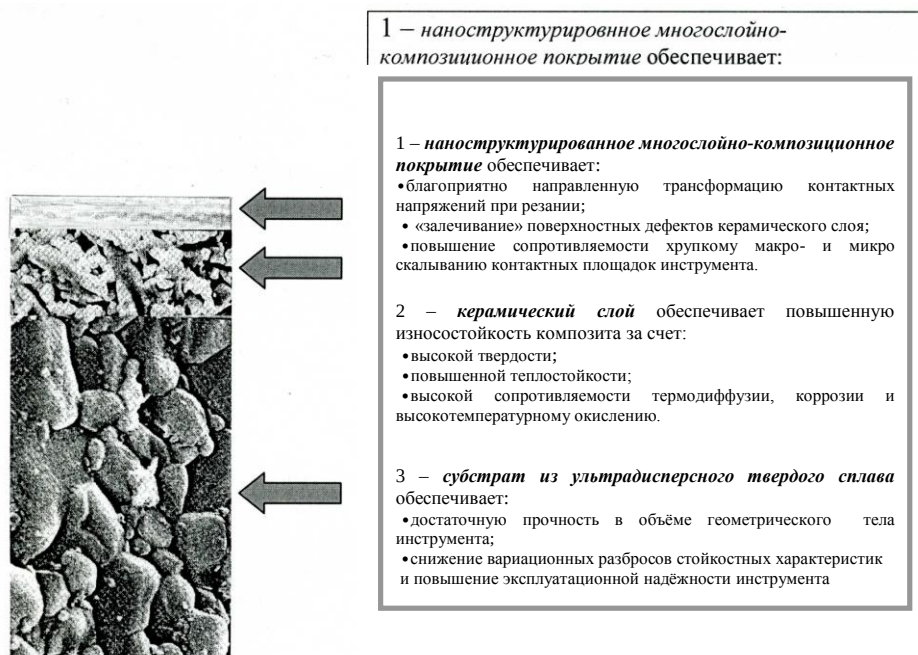


Рисунок 7 – Концептуальная схема архитектуры высокопрочной композиционной керамики (ВКК) с нано-структурированным многослойно-композиционным покрытием

Методику формирования **ВКК** с нано-структурированным покрытием базировали на вскрытии закономерностей горячего прессования, гидростатического уплотнения и газостатического доуплотнения материала, а также синтеза износостойких покрытий на мало - и токонепроводящих материалах [3,7]. Обобщенные представления о таких закономерностях позволяли успешно решить чрезвычайно сложную научно-техническую задачу соединения разнородных материалов типа «твердый сплав-керамика», «керамика-тугоплавкие соединения переходных металлов» и т.д.

Особое внимание было уделено выбору материалов керамического слоя и субстрата (твердого сплава). Такой выбор весьма ограничен следствии необходимости соблюдения требований совместимости термомеханических характеристик соединяемых слоев (коэффициенты термического расширения, модули упругости и т.д) [29]. Прочное

соединению межфазных границ слоев является одним из важнейших условий нормального функционирования инструмента из **ВКК**. При разработке **ВКК** предпочтение отдавали технологии формирования границ раздела фаз с диффузионным слоем. Для проведения детальных исследований были выбраны следующие сочетание элементов **ВКК**: субстрат (слой 1) на основе твердого сплава - WC-TaC-Co с ультрадисперсной структурой, керамический слой 2 на основе сложной композиции (Si_3N_4 , TiC, Y_2O_3 , Al_2O_3) и слой 3 в виде наноструктурированного многослойно-композиционного покрытия (см. рис.7) на основе систем Ti-(Ti,Al)N-(Ti,Cr,Al)N, Zr-(Zr,Cr)N-CrN.

Для компенсации физических функций СОТС в разрабатываемой системе «сухого» резания, использовали три основных элемента (рис.8)[26.27]:

1. Режущий инструмент из **ВКК** с многофункциональным композиционно-многослойным наноструктурированным покрытием (1,2).
2. Систему генерации и подачи ионизированной газовой смеси (ИГС, например, отфильтрованный воздух) непосредственно в область резания (4,6);
3. Устройство генерации ультразвуковых колебаний (УЗК), прикладываемых к режущему инструменту в направлении вектора скорости резания (7).

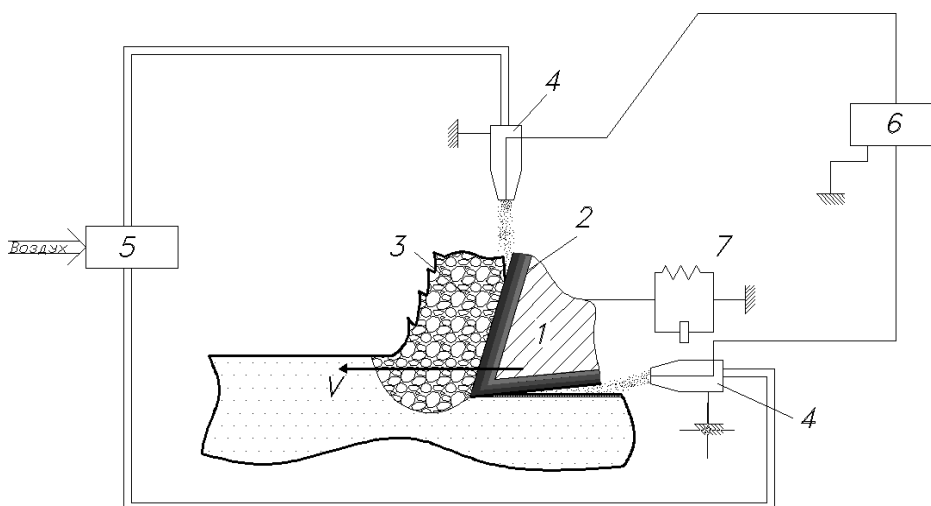


Рисунок 8 – Принципиальная схема системы экологически чистой «сухой» обработки с компенсацией физических функций СОТС: 1 - режущий инструмент, оснащенный СМП из ВКК с покрытием; 2 - многофункциональное наноструктурированное покрытие; 3 - срезаемая стружка; 4 - устройства генерации ионизированной газовой среды (воздуха); 5 - устройство для подачи газовой смеси (сжатого воздуха), 6 – источники питания устройств ионизации; 7 - система для генерации УЗК в направлении действия вектора скорости резания.

Использование инструмента, оснащенного СМП из разрабатываемой **ВКК** с наноструктурированным многофункциональным покрытием, в системах экологически чистого сухого резания с компенсацией физических функций СОТС позволяет прогнозировать увеличение эффективности сухого резания до уровня резания с СОТС или даже превышающего этот уровень, а также существенного повышения производительности и качества сухой обработки.

Для исследований различных свойств **ВКК** с покрытием была изготовлена опытная партия сменных многогранных пластин (СМП) формы 03111-0363 по ГОСТ 19041 (форма SNUN по стандарту ISO 120408) без отверстия с $r = 0,8$ мм. Для сравнения различных свойств разрабатываемых **ВКК** с покрытием со свойствами стандартных марок твердых сплавов и РК использовали также СМП из мелкозернистого твердого сплава ВК6-М, оксидной РК ВО-13 и HS2 (ФРГ), оксидно-карбидной РК ВОК-71, ВОК-200, слоистой ВОКС-300. Партии СМП разделяли на группы, одна из которых была использована для проведения исследований по оценке физико-механических и кристаллохимических свойств, другая - для оценки режущих свойств.

Используемые СМП из различных инструментальных материалов при закреплении в резцедержатель (ГОСТ 20872-80 и 19058-80) обеспечивали следующие значения геометрических параметров режущей части: $\gamma = -10^0$; $\alpha = 6-8^0$; $\varphi = \varphi_1 = 45^0$; $\lambda = 0^0$.

Исследования режущих свойств СМП проводили при продольном ($D_3 = 160$ мм, $L = 400$ мм) и поперечном ($D_H = 350$ мм; $D_B = 100$ мм) точении стали 45 в термообработанном состоянии (HRC 42-45) и стали 50Г (HRC 58) на универсальном токарном станке 16К20 при $v = 80-350$ м/мин; $S = 0,1-0,25$ мм/об; $t = 0,5-1,0$ мм.

Результаты исследования режущих свойств инструмента, оснащенного СМП из различных инструментальных материалов и разрабатываемой **ВКК** при поперечном точении заготовок из стали 45 в термообработанном состоянии (HRC 42-45) представлены в таблице 4.

Как видно из представленных данных наиболее высокие режущие свойства при точении с переменной скоростью резания (торцовое точение) обеспечивали инструменты, оснащенные СМП из **ВКК** с наноструктурированным покрытием при сухом резании ($K_{ст} = 9,78$) по сравнению с инструментом из стандартных типов керамики (ВО-13, ВОК-71, HS2), твердого сплава (ВК6-М) и особенно при резании с компенсацией физических функций СОТС ($K_{ст} = 11,7$), в том числе и по сравнению с инструментом из твердого сплава ВК6-М с наноструктурированным

покрытием, при подаче в зону обработки ионизированного воздуха или использования системы сухой обработки ЭЧР с компенсацией физических функций СОТС (см. табл.4).

Проведены также исследования режущих свойств инструмента, оснащенного СМП из **ВКК** при продольном точении термообработанной стали 50Г (HRC 58), результаты которых представлены на рис.9.

Таблица 5 – Результаты исследований режущих свойств

Инструментальный материал	Показатели режущих свойств различных СМП при $h_3=0,25$ мм с $v=420$ м/мин; $S=0,1$ мм/об; $t=0,5$ мм.	
	Время резания до отказа, мин	Коэффициент стойкости $K_{ст}$
ВК6-М	1,22	1
ВК6-М*	1,24	1,03
ВК6-М-[Ti-(Ti,Al)N-(Ti,Cr,Al)N**]	2,8	2,3
ВО-13	2,8	2,3
ВОК-71	2,6	2,13
НС2 (РК, ФРГ)	4,5	3,69
ВКК	5,3	4,34
ВКК-Ti-(Ti,Al)N-(Ti,Cr,Al)N	8,0	9,78
ВКК-Ti-(Ti,Al)N-(Ti,Cr,Al)N**	9,6	11,7

* - исследования при подаче в зону обработки ионизированной газовой среды (ИГС);**- исследования при использовании системы экологически чистого резания с компенсацией физических функций СОТС (ЭЧР).

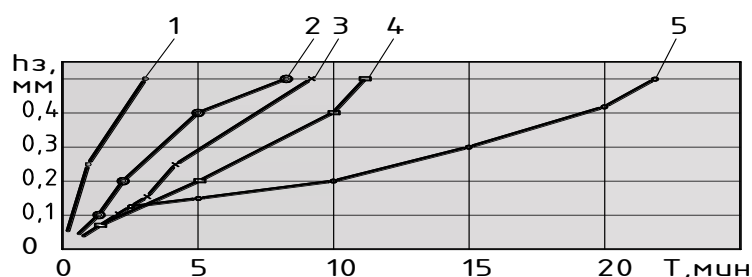


Рисунок 9 – Зависимость величины фаски износа задней поверхности инструмента h_3 , оснащенного СМП из различных инструментальных материалов, от времени резания T при различных условиях продольного точения стали 50 Г (HRC 58) с $v=340$ м/мин; $S=0,15$ мм/об; $t=0,5$ мм: 1- СМП из ВК6-М при сухой обработке; 2 - СМП из ВК6-М – Ti-(Ti,Al)N-(Ti,Cr,Al)N при использовании технологии ЭЧР; 3- СМП из ВОК-71 при сухой обработке; 4 - СМП из ВКК при сухой обработке; 5 – ВКК- Ti-(Ti,Al)N-(Ti,Cr,Al)N при использовании технологии ЭЧР.

Анализ механизма изнашивания СМП из ВКК - Ti-(Ti,Al)N-(Ti,Cr,Al)N при использовании технологии ЭЧР (рис.10, б) позволяет отметить сбалансированность очагов изнашивания передней и задней поверхностей инструмента при практически полном отсутствии характерных для стандартного керамического инструмента сколов и выкрашиваний (рис.10, а).

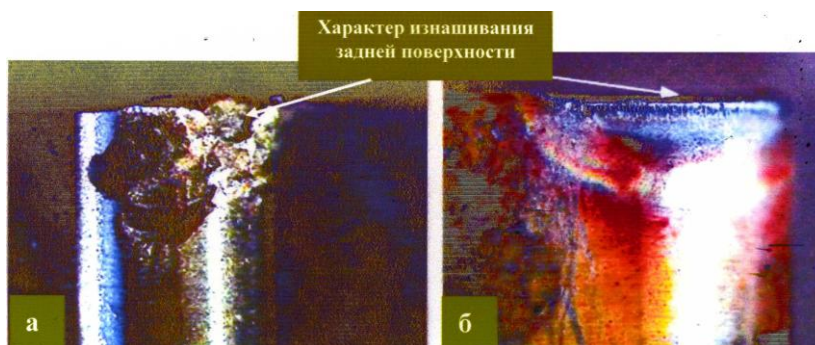


Рисунок 10 – Характер изнашивания СМП из смешанной керамики ВКК-71 при сухом резании, (а) и СМП из разрабатываемой ВКК-Ti-(Ti,Al)N-(Ti,Cr,Al)N при использовании технология ЭЧР (б) при продольном точении стали 50Г (HRC 58) в течение 5 мин с $v = 348$ м/мин; $S=0,15$ мм/об; $t=0,5$ мм

Заключение

Разработана методология, процессы и технология фильтруемого вакуумно-дугового осаждения (**ФВДО**) наноструктурированных многослойно-композиционных покрытий (**МКП**) на рабочих поверхностях сложнопрофильных твердосплавных СМП, а также цельнотвердосплавного и быстрорежущего инструмента.

Аттестационные испытания СМП с разработанными **МКП** при обработке материалов авиационного двигателестроения (конструкционные стали, титановые и никелевые сплавы) показали их высокую эффективность не только в сравнении с СМП без покрытий, но и с СМП со стандартными износостойкими покрытиями, рекомендуемыми для указанных целей.

Аттестационные промышленные испытания сложнопрофильных твердосплавных СМП форм LMNX и RPUX с разработанными **МКП** на основе наноструктурированной системы Ti-TiAlN-TiN при черновой обработке наклепанной поверхности катания железнодорожных колес показали, что СМП с разработанными **МКП** не уступают по надежности и стойкости СМП со стандартными **МКП** ведущих мировых производителей твердосплавного инструмента.

В системе экологически чистого «сухого» высокоскоростного резания (ЭЧР) с компенсаций физических функций СОТС важнейшим элементом является разработанная высокопрочная композиционная керамика (**ВКК**) с наноструктурированным покрытием, позволяющая повысить стойкость режущего инструмента до 2-3 раз по сравнению со стойкостью инструмента, оснащенного СМП из режущей керамики стандартного типа. Технология сухого резания с использованием разработанных **ВКК** характеризуется следующими особенностями:

- интенсификацией конвекционных процессов отвода тепла из области обработки (компенсация охлаждающая функция СОТС);
- уменьшением мощности фрикционных источников тепла (компенсация смазочная функция СОТС);
- снижением поверхностной энергии локальных поверхностных объемов формируемой стружки (компенсация пластифицирующие эффекты СОТС).

Список литературы: 1. Vetter J., Burgmer W., Dederichs H., Perry A. The architecture and performance of compositionally gradient and multi-layer PVD coating. Material Science Forum Vols. 163 - 165 (1994) pp.527 - 532. 2. Byrne, G. Advancing Cutting Technology. /G.Byrne, D.Dornfeld, B. Denkena. // CIRP Annals. Vol 52/2/2003. 3. Верещака, А.С. Повышение эффективности инструмента путем управления составом, структурой и свойствами покрытий. /А.С. Верещака, А.А. Верещака // Упрочняющие технологии и покрытия. 2005, № 9. С.9-19. 4. Верещака А.С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями - М.: Машиностроение, 1993. 336 с. 5. Верещака А.С. Некоторые методологические принципы создания функциональных покрытий для режущего инструмента. В кн. Современные технологии в машиностроении. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2007. С. 210-232. 6. Moll E., Bergmann E.. Hard coatings by plasma-assisted PVD technologies: industrial practice. Surface and Coating Technology, 37 (1989) 483- 509. 7. Holleck H. 1990. «Basic principles of specific application of ceramic materials as protective layers». Surface and coatings Tecnnology, 43/44 245 - 258. 8. Верещака, А.С. Анализ основных аспектов применения многослойно-композиционных нано-структурированных функциональных покрытий для режущего инструмента //А.С.Верещака, Б. Карпушевски, Л.Г.Дюбнер. В кн. Высокие технологии в машиностроении. Сб. научных трудов. С 56, Вып. 2. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2008. С.72-87. 9. Верещака А.С. Основные аспекты применения и совершенствования режущих инструментов с износостойкими покрытиями //СТИН.2000.- № 9. С.33-40. 10. Гольдштейн, М.И. Металлофизика высокопрочных сплавов /М.И. Гольдштейн, В.С. Литвинов, Б.М. Бронфин. – М.: Металлургия, 1986. – 312 с. 11. Fox-Rabinovich G.S., Kovalev A.I., Aguirre M.H., Beake B.D., Yamamoto K., Veldhuis S.C., Endrino J.L., Wainstein D.L., Rashkovskiy A.Y. Design and performance of AlTiN and TiAlCrN PVD coatings for machining of hard to cut materials. Surface & Coatings Technology 204 (2009) 489–496. 12. Paldey S., Deevi S.C. Single layer and multilayer wear resistant coatings of

(Ti,Al)N: a review. *Materials Science and Engineering A342* (2003) 58-79.

13. Faga M.G., Gautiel G., Calzavarini R., Perucca M., Aimo Boot E., Cartasegna F., Settineri L. AlSiTiN nanocomposite coatings developed via Arc Cathodic PVD: Evaluation of wear resistance via tribological analysis and high speed machining operations. *Wear* 263 (2007) 1306–1313.

14. Vetter J., Krug T., von der Heide V.. AlTiCrNO coatings for dry cutting deposited by reactive cathodic vacuum arc evaporation. *Surface & Coatings Technology* 174 –175 (2003) 615–619.

15. Kim S.K., Vinh P.V., Kim J.H., Ngoc T. Deposition of superhard TiAlSiN thin films by cathodic arc plasma deposition. *Surface & Coatings Technology* 200 (2005) 1391–1394.

16. Kenji Yamamoto, Susumu Kujime, Kazuki Takahara. Structural and mechanical property of Si incorporated (Ti,Cr,Al)N coatings deposited by arc ion plating process. *Surface & Coatings Technology* 200 (2005) 1383 – 1390.

17. Tanaka Y., Ichimiya N., Onishi Y., Yamada Y. Structure and properties of Al–Ti–Si–N coatings prepared by the cathodic arc ion plating method for high speed cutting applications. *Surface and Coatings Technology* 146 – 147 (2001) 215–221.

18. Chokshi, A. H. On the validity of the Hall-Petch relationship in nanocrystalline materials. *Scripta Metall /Chokshi, A. H., Rosen, A., Karch, J., and Gleiter, H.. v.23, 1998. pp. 1679-1684.*

19. Okumiya, M. Mechanical properties and tribological behavior of TiN-CrAlN and CrN-CrAlN multilayer coatings. //M. Okumiya, M. Gripenberg.// *Surface and Coating Technologies* 112 (1999). - P.123-128.

20. Cselle T. Nanostrukturierte Schichten in der Werkstoff. Platit AG. Werkzeugtagung 2002.

21. Табаков В.П. Формирование износостойких ионно-плазменных покрытий режущего инструмента.- М.: Машиностроение, 2008. – 311 с.

22. Григорьев С.Н. Методы повышения стойкости режущего инструмента. - М.: Машиностроение, 2009. – 368 с.

23. Хокинс, М. Металлические и керамические покрытия: Получение, Свойства и применение: Пер. с англ. /М.Хокинс, В. Васантари, П. Сидки. //М.: Мир, 2000. - 518 с.

24. Тушинский, Л.И. Исследование структуры и физико-механических свойств покрытий / Л.И.Тушинский, А.В. Плохов. - Новосибирск: Наука, 1986.- 200 с.

25. Верецака А.С., Хаустова О.Ю. Дюбнер Л.Г. Исследование характеристик качества поверхностного слоя при использовании экологически дружелюбной технологии сухой обработки. В кн: Современные технологии в машиностроении. Сборник научных трудов по редакцией А.И. Грабченко. – Том 2. Харьков:НТУ «ХПИ», 2006. С. 306-319. ISBN 966-513-429-5 (полное издание), ISBN 966-593-431-7 (Том 2).

26. Кириллов А.К. Создание системы сухого резания с компенсацией эффектов смазочно-охлаждающих технологических сред при точении конструкционных материалов //Автоматизация и современные технологии.-2006.- №1.-С.9-16.

27. Кириллов А.К., Верецака А.С., Козлов А.А., Робакидзе З.Ю. Разработка и исследование технологии сухого резания труднообрабатываемых материалов с компенсацией физических функций СОТС // СТИН.- 2009. -№1. С.35-40.

28. Елютин А.В., Аникин В.Н., Блинков И.В., Верецака А.С. Методологические принципы создания высокопрочной градиентно-слоистой керамики с покрытием для скоростной лезвийной обработки без применения СОТС. Труды конгресса “Конструкторско-технологическая информатика 2000.Том 1. –М.: МГТУ “СТАНКИН”, 2000, с.180 – 182.

29. Horst-Dieter Tietz. Technische keramik.VDI Verlag GmbH, Dusseldorf, 1994. 364 s.

В. Л. ДОБРОСКОК, д-р техн. наук,
С. И. ЧЕРНЫШОВ, канд. техн. наук,
Я. Н. ГАРАЩЕНКО, канд. техн. наук,
Д. П. СИДОРЧУК, Харьков, Украина

ОБРАТНЫЙ ИНЖИНИРИНГ ПРОМЫШЛЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОПТИКО-ЦИФРОВОЙ УСТАНОВКИ ОБЪЕМНОГО СКАНИРОВАНИЯ IMETRIC ISCAN

Розглянуто особливості технології зворотного інжинірингу деталей з використанням оптико-цифрової установки Imetric IScan II. Описано технологічні можливості оптико-цифрової установки. Представлено результати роботи зі створення триангуляційних моделей промислових виробів й їхньої верифікації.

Рассмотрены особенности технологии обратного инжиниринга деталей с использованием оптико-цифровой установки Imetric IScan II. Описаны технологические возможности оптико-цифровой установки. Представлены результаты работы по созданию триангуляционных моделей промышленных изделий и их верификации.

Features of reverse engineering of products using an optical-digital machine Imetric IScan II are considered. Technological opportunities of the optical-digital machine are described. Work results on creation of triangulation models of the industrial products and their verification are presented.

Введение

Обратный инжиниринг – интенсивно развивающаяся технология, получившая широкое применение в индустриально развитых странах. Целью обратного инжиниринга является получение математической модели промышленного изделия на основе измерений реального объекта [1].

Одним из наиболее эффективных методов получения 3D моделей изделий является оптико-цифровое сканирование, которое имеет ряд преимуществ по сравнению с другими методами:

- отсутствие контакта с измеряемой поверхностью;
- высокая точность измерения криволинейных поверхностей;
- упрощение работы дизайнера, благодаря возможности создавать модели по объектам из пластичных материалов (глина, пластилин и др.).

Этот метод получил широкое применение. Но при этом отсутствуют научно-обоснованные данные по его технологическим возможностям создания 3D моделей промышленных изделий.

Данная статья посвящена рассмотрению технологических возможностей создания 3D моделей и точности их получения при использовании оптико-цифрового сканирования изделий.

Работа выполнялась в центре высоких технологий учебно-научно-производственного объединения при НТУ «ХПИ» (кафедра "Интегрированные технологии машиностроения" им. М.Ф. Семко) с использованием оптико-цифровой установки объемного сканирования Imetric IScan II. Общая схема обратного инжиниринга промышленных изделий представлена на рис. 1. Принципы построения схемы определяются стратегиями получения 3D моделей с помощью оптико-цифровой установки и их последующей материализации с использованием технологий Rapid Prototyping или обработкой резанием на станках с ЧПУ.

Установка объемного сканирования Imetric IScan II

Общий вид оптико-цифровой установки объемного сканирования IScan II (производитель Imetric, Швейцария) представлен на рис. 2.

Установка IScan II состоит из следующих элементов [2]:

- метрологической фотокамеры с традиционной оптикой (фокусное расстояние 24 мм), со встроенной фотовспышкой;
- фотограмметрического программного обеспечения, позволяющего выполнять следующие операции: распознавание образов с помощью фотокамеры, автоматическое измерение объекта с наклеенными светоконтрастными мишенями, идентификацию мишеней, создание систем измеренных точек и их автоматическую ориентацию, трансформация и редактирование координат систем измеренных точек, анализ геометрии, визуализация и передача (экспорт) данных в CAD-системы.

Вспомогательное оснащение системы IScan II включает комплект светоконтрастных мишеней различных диаметров, набор углеволоконных стандартных стержней с мишенями, покрытыми светоотражательным материалом и др.

Установка позволяет сканировать объекты с габаритными размерами не менее 100×100×100 мм. Перед сканированием выполняется специальная процедура настройки, а также при необходимости калибровка. Для объектов сравнительно небольших размеров (до 300 мм) сканирование может выполняться на калибровочной пластине или с использованием вспомогательного объекта с наклеенными мишенями, располагаемого вблизи детали. При сканировании крупногабаритных объектов светоконтрастные мишени наклеиваются непосредственно на их поверхности.

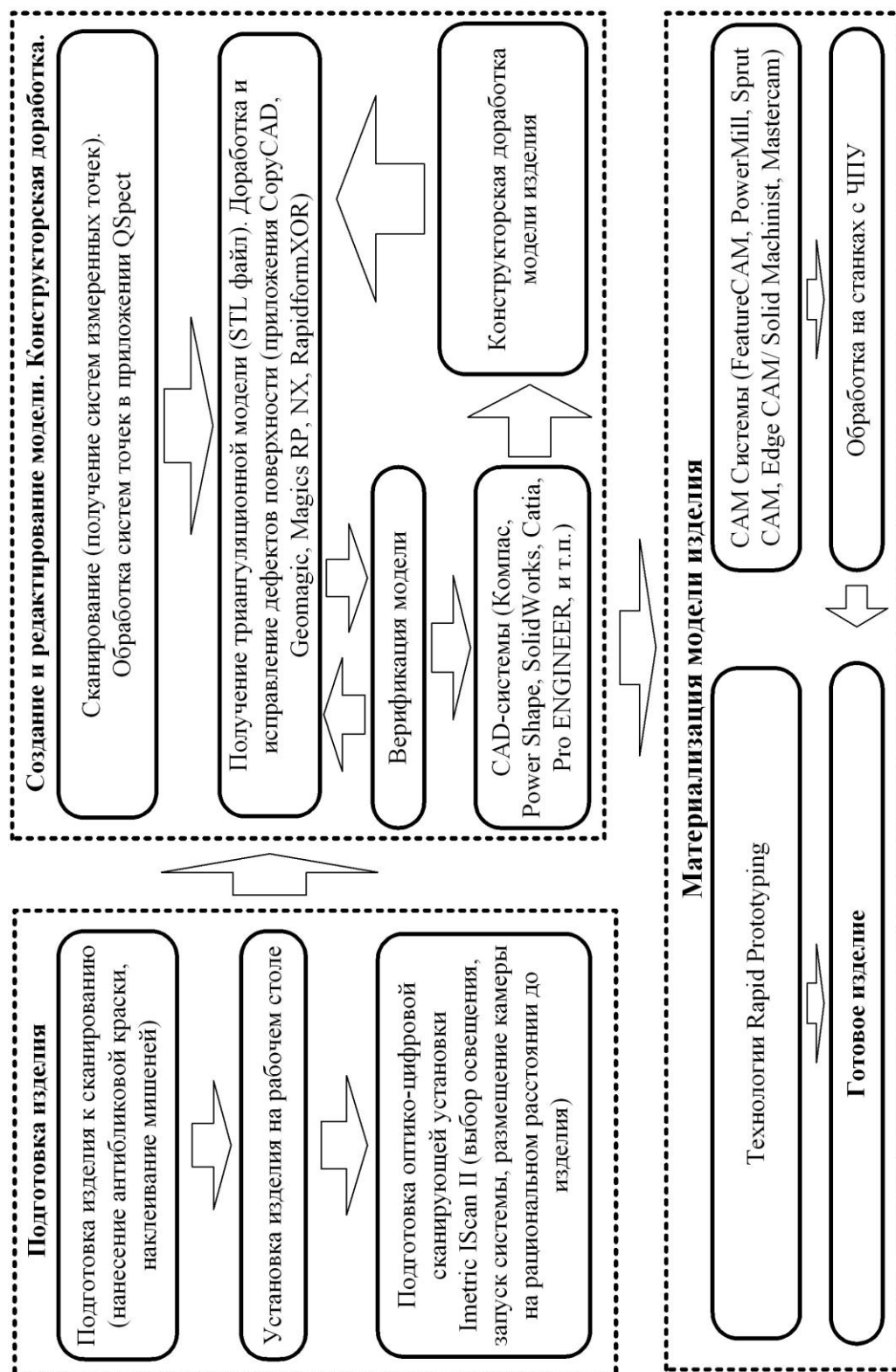


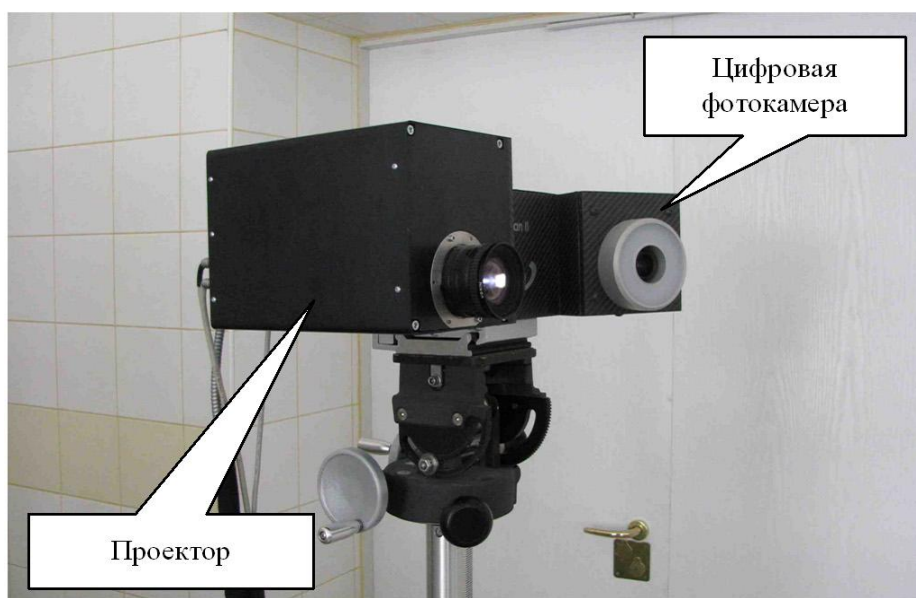
Рисунок 1 – Общая схема обратного инжиниринга промышленных изделий с использованием оптико-цифровой установки

На качество сканирования существенно влияют светоотражательные свойства поверхности объекта. Поэтому, как правило, на сканируемый объект наносят антибликовое покрытие. Соответственно необходимо уделять существенное внимание (при настройке фотокамеры) на интенсивность

окружающего освещения, т. к. возникновение бликов на поверхности объекта приводит к появлению в этих местах разрывов поверхности.

Система сканирования IScan II позволяет за приемлемое время (несколько минут или часов в зависимости от сложности изделия) выполнять сканирование объекта с получением системы точек поверхности и автоматической регистрацией их в единой системе координат.

Сканирующая головка



Система обработки результатов сканирования



Рисунок 2 – Оптико-цифровая установка объемного сканирования Imetric IScan II

Создание триангуляционных моделей промышленных изделий

Работа на установке Iscan II состоит из следующих этапов [3]:

- *предварительные этапы:*

- подготовка изделия к измерениям путем нанесения антибликового покрытия (лучшее качество сканирования обеспечивается при использовании краски серого цвета);

- наклеивание светоконтрастных мишеней;

- *этапы, выполняемые для каждого ракурса сканирования:*

- задание положения сканирующей головки;

- настройка процесса сканирования (задание порога чувствительности камеры для процессов сканирования и распознавания мишеней, автоматическое обнаружение и интерактивное задание имен мишеней);

- сканирование;

- получение набора систем точек;

- визуальный анализ текущей и/или общей системы измеренных точек;

- *заключительные этапы:*

- визуальный анализ общей системы измеренных точек;

- обрезка и/или удаление непредставительных систем или групп точек;

- сохранение данных в формате ASC.

Процесс сканирования эффективен при обеспечении равномерного распределения светоконтрастных мишеней на поверхности сканируемого объекта (из расчета попадания около 20-и мишеней в один ракурс) и корректного выбора экспозиции камеры.

Светоконтрастные мишени представляют собой распечатанные на принтере черные полосы бумаги с нанесенными на них белыми реперными метками ($\varnothing 2 \div 4$ мм). Реперные метки при проведении одного сканирования объекта должны иметь одинаковый размер. Необходимо, чтобы их размер на изображении сканируемого объекта был не менее $5 \div 6$ пикселей, также он зависит от масштабов объекта, разрешения и объектива камеры. В рассматриваемом случае их размер составлял 3 мм.

На рис. 3 представлены примеры подготовленных объектов к сканированию. При наклеивании мишеней придерживаются следующей стратегии. Мишени распределяются между отдельными группами: ориентации, масштабирования, мишеней для авто-обработки, и дополнительной сети мишеней. Мишень может принадлежать одной или нескольким группам. Группа ориентации включает пересекающиеся не менее 4-х мишеней и используется для определения начальной системы координат

и автоматического ориентирования группы изображений. Группу следует размещать в центре (или достаточно близко к нему) сканируемого объекта. Группа масштаба используется системой для определения масштаба представления объекта (проекта). Мишени этой группы должны распределяться в нескольких направлениях под взаимным углом 45° .



Рисунок 3 – Объекты (отопительная печь и обшивка передней двери автомобиля) подготовленные для сканирования на оптико-цифровой установке

Мишени автоматической обработки необходимы для автоматизации процесса измерений.

В процессе сканирования необходимо, чтобы в изображение камеры попадали минимум четыре распознанные мишени, поэтому следует заранее планировать расположение мишеней и концентрировать их рядом с пересечениями поверхностей. Но при этом необходимо выдерживать расстояние от мишеней до условных границ поверхностей не менее $2 \div 4$ мм.

Выбор положения проектора, как и ориентация измеряемого объекта, имеют определяющее значение для эффективного процесса сканирования.

На основе опыта эксплуатации и [2, 3] можно сформулировать основные принципы рациональной стратегии сканирования:

- объект измеряется с различных ракурсов (до $20 \div 30$ изображений для изделий с размерами до 400 мм);
- в каждом новом изображении должны фиксироваться как минимум четыре мишени из предыдущих видов и четыре новых мишени (лучшие результаты были получены при их общем количестве $16 \div 20$);
- сканируемые мишени должны одновременно попадать в рабочие зоны камеры и проектора;
- полученные системы измеренных точек должны охватывать всю поверхность объекта, обеспечивая наличие общих участков поверхности для различных ракурсов измерения (желательно до 5-и, но для участков, где выявляется высокая погрешность измерения, следует удалять непредставительные системы точек);
- сканирование при различных ракурсах выполняется при одном расстоянии до объекта. При этом каждое измерение должно охватить как

можно большую область поверхности сканируемого объекта, обеспечивая наибольшее количество задействованных мишеней.

Сканирование объекта выполняется с запланированных ракурсов. Затем изображения поверхности обрабатываются в сканирующей головке, и полученная система точек каждого измерения передается на компьютер для предварительной обработки.

Обработка полученных данных. Для обработки данных сканирования в установке IScan II используется специализированная система QSpec [2]. Для каждого изделия в системе создается новый проект и выполняется сканирование объекта с помощью мастера работы со сканером или в него импортируются ранее полученные системы измеренных точек (файлы *.asc). На рис. 4 представлена схема последовательности обработки данных сканирования и экранные формы пакета QSpec на этапах визуализации и редактирования систем измеренных точек для передней фары автомобиля.

В режиме съемки с нескольких ракурсов используется автоматическая обработка полученных результатов с определением положения всех систем точек. В зависимости от сложности измеряемого изделия некоторые системы точек могут получить неточную или неправильную ориентацию. Эти непредставительные системы точек удаляются или сохраняются в отдельные файлы для задания правильного их положения в специализированных CAD-системах (Geomagic Studio, CopyCAD или Magics RP).

При необходимости используются инструменты редактирования систем точек, анализа и преобразования системы координат для достижения на следующем этапе триангуляции требуемого качества поверхностей модели. Затем создается отчет о проведенных измерениях, сохраняется проект и сохраняется итоговый набор измеренных точек.

Создание триангуляционной модели промышленных изделий на основе систем измеренных точек.

Рассмотрим возможности по созданию триангуляционных моделей, на примере конкретных промышленных изделий, в системе Geomagic Studio (для систем CopyCAD [4, 5, 6] и Magics RP [7] стратегии работ аналогичны).

Geomagic Studio позволяет создавать трехмерные модели изделий по отсканированным данным (системам измеренных точек) и редактировать их [8].

Импорт данных сканирования производился с использованием формата ASC. Для уменьшения размера файлов и соответственно времени обработки моделей, системы измеренных точек загружались не полностью, а в объеме 25÷50 % от их общего количества.

Непредставительные точки, которые могут повлиять на точность триангуляционной модели (выбросы, шумы и пр.) удалялись. Данная операция выполняется в ручном режиме, с помощью инструментов выделения или автоматически с помощью команд "Select Outliers" и "Select Disconnected".

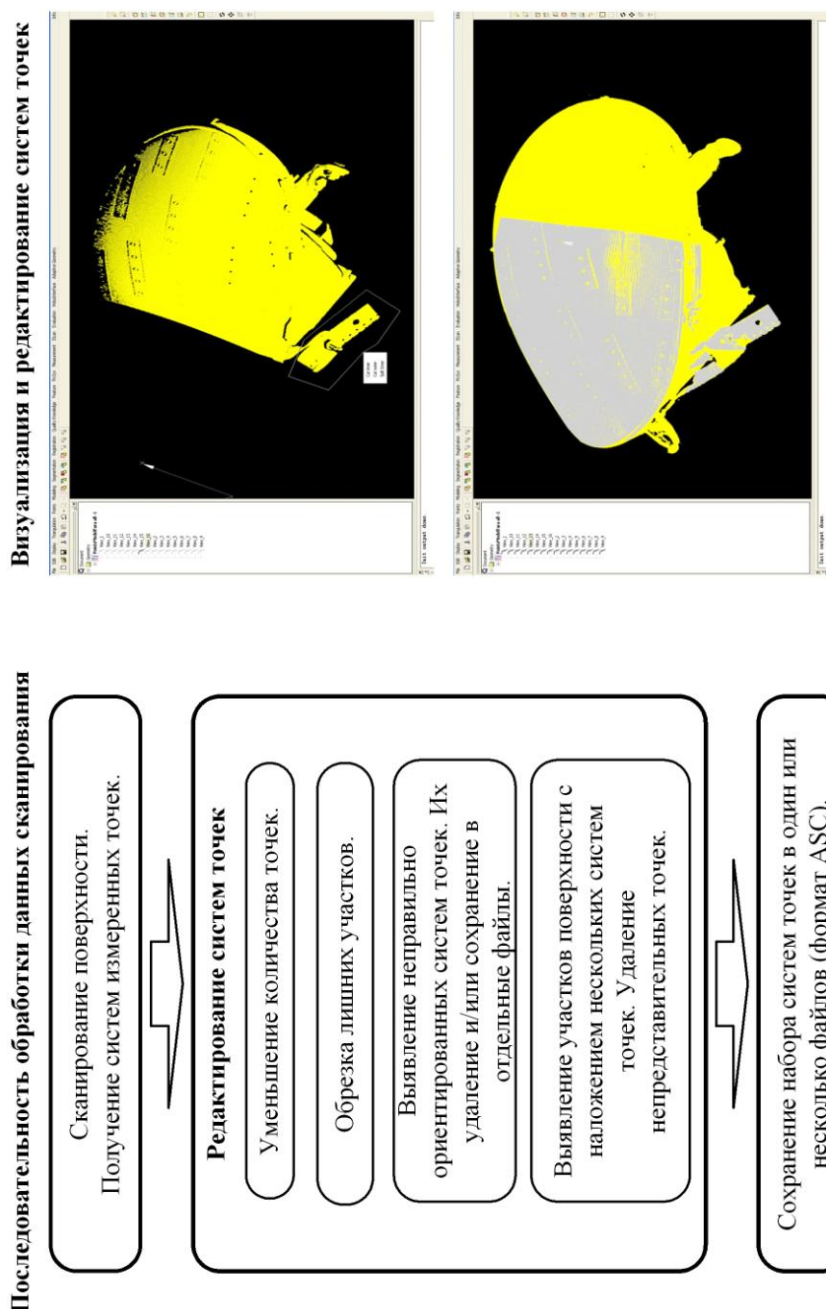


Рисунок 4 – Обработка данных сканирования в приложении Qspect

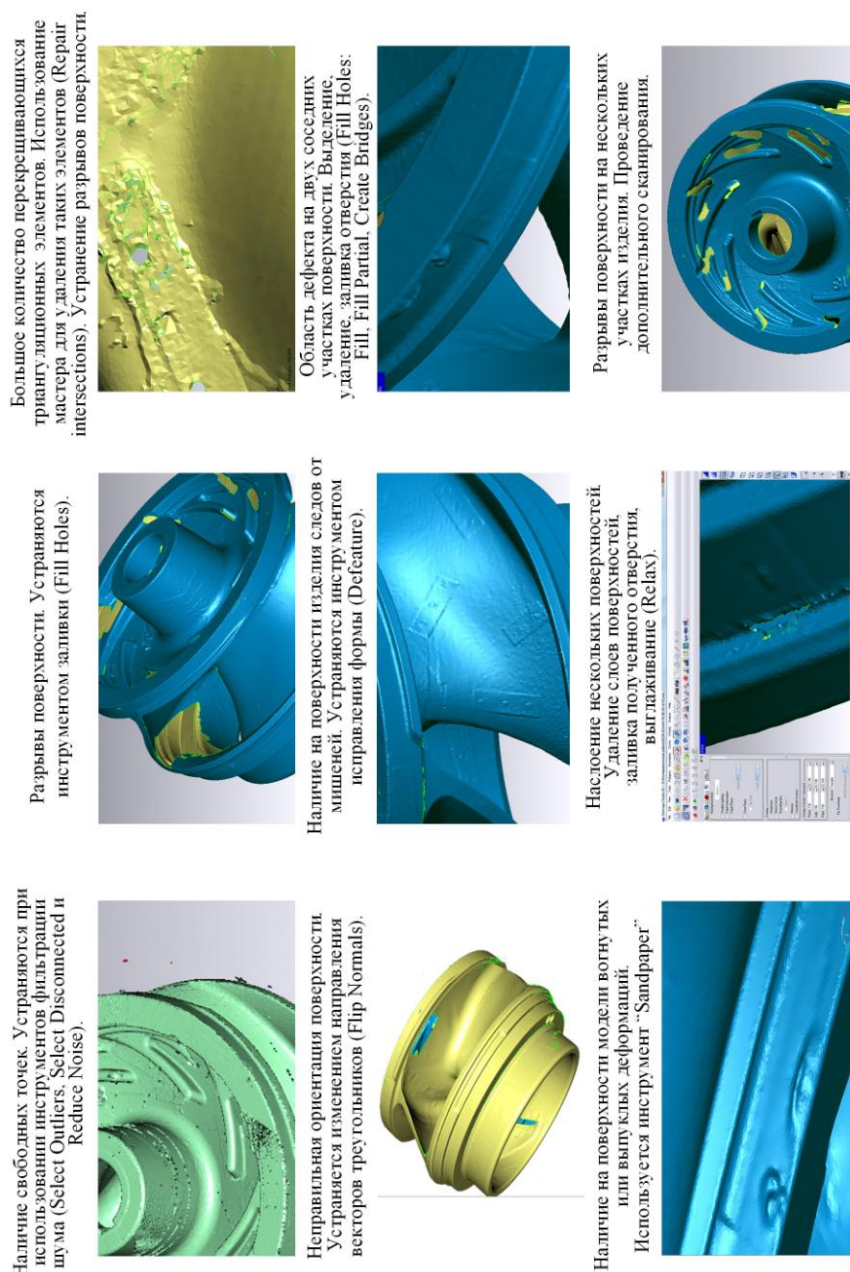


Рисунок 5 – Особенности редактирования триангуляционных моделей

Подготовленная точечная модель триангулируется с помощью команды "Wrap". Основные параметры этой команды: количество треугольников, уровни качества модели и фильтрации шумов.

Триангуляционная модель, полученная на основе систем точек, как правило, не является пригодной для ее материализации. Поэтому в Geomagic Studio предусмотрен ряд инструментов для устранения дефектов поверхности. На рис. 5 представлены некоторые особенности работы по устранению дефектов поверхности (разрывов и наслоений поверхностей, неровностей краев, пересечений треугольников и пр.).

При необходимости может выполняться общее сглаживание модели (с сохранением или без сохранения границ поверхностей), позволяющее устранить большую часть мелких дефектов. Но такой подход устранения дефектов может привести к увеличению погрешности на участках возле границ поверхностей и мелких элементов модели.

Для получения поверхностной модели (NURBS) на основе триангуляционной в Geomagic Studio предлагается обширный набор специальных инструментов [9, 10].

На рис. 6 представлен пример модели изделия полученной на этапе триангуляции системы измеренных точек и после ее редактирования (устранения дефектов поверхности) в системе Magics RP.

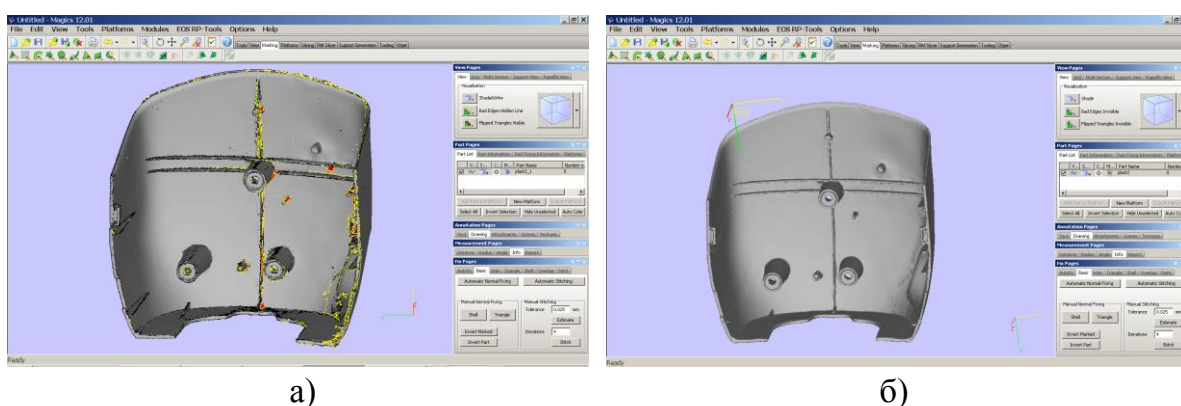


Рисунок 6 – Модель изделия (фары автомобиля) в системе Magics RP:
а) после триангуляции, б) после устранения дефектов.

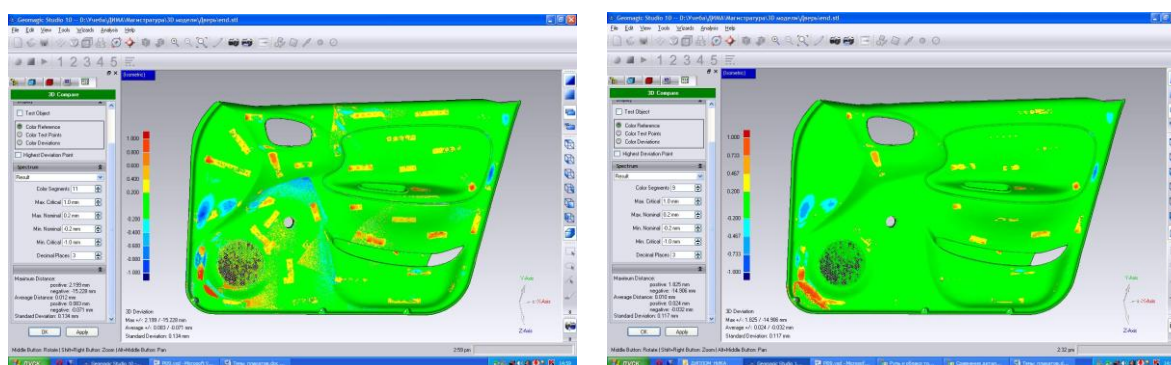
Система Magics RP имеет некоторые особенности по редактированию триангуляционной модели. Например, наиболее эффективным подходом по устранению дефектов поверхности является: выделение проблемного участка поверхности, использование функций "Triangle reduction" (уменьшение треугольников) и "Smoothing" (сглаживание без опции "Skip Bad Edges").

Верификация триангуляционных моделей

Сканирование, редактирование системы измеренных точек, триангуляция точечной модели, редактирование триангуляционной модели – этапы обратного инжиниринга промышленных изделий. Выполнение каждого из этих этапов добавляет определенную погрешность в триангуляционную модель изделия. Поэтому заключительным этапом обратного инжиниринга является верификация полученных моделей. По результатам верификации триангуляционных моделей принимается решение об их готовности к материализации.

При проведении исследований оценка погрешности полученных моделей выполнялась двумя способами: с применением цветных карт погрешности в системе Geomagic Studio и посредством статистического анализа отклонений размеров триангуляционной модели от реального объекта в математическом пакете Maple.

На рис. 7 представлена система Geomagic Studio с визуализацией карты погрешности на примере обшивки передней двери автомобиля.



а)

б)

Рисунок 7 – Визуализация отклонений для обшивки передней двери:

а) между системой точек и полученной моделью;

б) между моделями до и после редактирования.

Использование карты погрешности удобно для выявления и оценки причин вызывающих отклонения. Анализ таких карт для различных изделий позволил выявить основные факторы, влияющие на формирование результирующей погрешности. На этапах сканирования изделия, триангуляции и редактирования модели к таким факторам относятся:

- количество используемых мишеней на поверхности изделия;
- расстояние от наклеенных мишеней до границ поверхностей;
- расположение мишеней на границах поверхностей изделия или участках с малым радиусом кривизны;
- наличие бликов на поверхности изделия при сканировании;
- количество систем точек для одного участка поверхности;
- уровень проработанности точечной модели (удаление непредставительных точек);
- параметры триангуляции (количество треугольников, уровни фильтрации шумов и т. д.);

- использование инструментов выглаживания и их параметры (сила выглаживания и т. д.);

- выбор стратегии устранения дефектов поверхности (в основном определяется выбором CAD-системы).

Статистический анализ погрешности размеров полученной модели выполнялся с применением математического пакета Maple. Размеры реальных изделий измерялись с использованием штангенциркуля (0,05 мм), а триангуляционных моделей в системе Magics RP.

Гистограммы плотности распределения абсолютных и относительных погрешностей для модели обшивки передней двери автомобиля представлены на рис. 8. Объем выборки составлял 30 измерений, основные статистические характеристики приведены в табл.

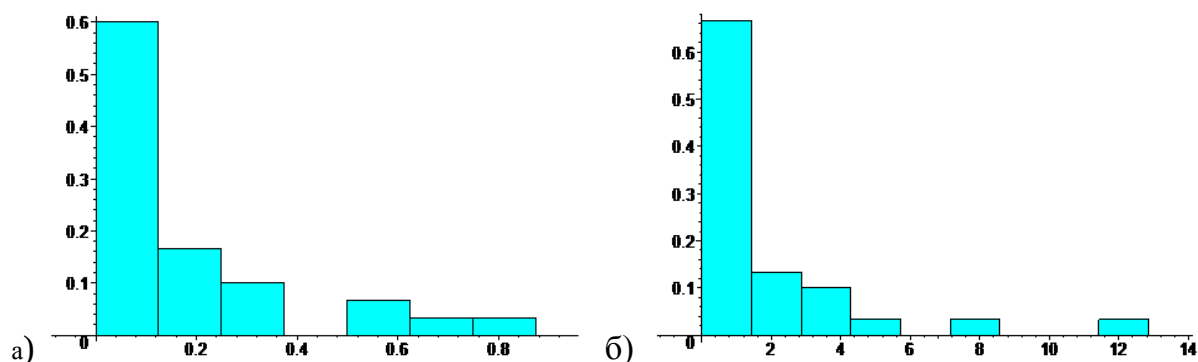


Рисунок 8 – Гистограммы плотности распределения погрешности моделирования обшивки передней двери автомобиля: а) абсолютная погрешность; б) относительная погрешность.

Таблица – Статистические характеристики распределения величины погрешностей модели обшивки передней двери автомобиля

Статистические характеристики	Погрешность размеров	
	абсолютная, мм	относительная, %
Интервал значений, $x_{\min} \div x_{\max}$	0 ÷ 0,87	0 ÷ 12,9
Среднеарифметическая, $\bar{x}$	0,18	1,8
Среднеквадратическое отклонение, s	0,21	2,7

По результатам верификации обшивки передней двери автомобиля (табл.) и других изделий была определена точность создания триангуляционной модели с использованием оптико-цифровой установки

объемного сканирования Imetric IScan II и современных программных средств. Погрешность создания моделей составила $\pm 0,2 \div 0,5$ мм (при погрешности сканирования данной установкой $\pm 0,04$ мм). Исходя из полученных данных, можно сделать вывод о существенном резерве повышения точности обратного инжиниринга. Перспективным путем может быть совершенствование методов редактирования систем измеренных точек и элементов триангуляционных моделей. Такой подход создаст методологическую основу создания триангуляционных моделей повышенной точности.

Заключение

Рассмотрены особенности обратного инжиниринга промышленных изделий с использованием оптико-цифровой установки объемного сканирования Imetric IScan II и систем QSpec (для обработки данных сканирования), Geomagic Studio, CopyCAD, Magics RP (для создания триангуляционных моделей изделий).

На основе верификации триангуляционных моделей промышленных изделий определены технологические возможности установки и выявлены факторы, влияющие на формирование погрешности создаваемых моделей.

Результаты исследования создают методологическую основу для последующего изучения влияния выявленных факторов на составляющие погрешности моделей промышленных изделий, что позволит разработать научно-обоснованные подходы по повышению их точности.

Список литературы: 1. Клименко В.Ю. Реверсный инжиниринг: учебн. пособие, Запорожье, 2009 -116 с. 2. IScan System manual. Porrentruy: Imetric SA, 2003. - 24 с. 3. ImetricS Software manual. Porrentruy: Imetric SA, 2002. - 83 с. 4. Delcam – CAD/CAM Software Creators. - Web: <http://www.delcam.com>. 5. Делкам - Урал - Лицензионное программное обеспечение для автоматизации проектирования (САПР) и решений инженерных задач. - Web: <http://www.delcam-ural.ru>. 6. Делкам - Новосибирск. - Web: <http://www.spider.nrcde.ru>. 7. Компания Bibus, Украина. - Web: <http://bibus.com.ua>. 8. Инжиниринговая компания ТЕСИС. - Web: <http://www.thesis.com.ru>. 9. Geomagic: 3D Software for creating 3D models from 3D scanner data. - Web: <http://www.geomagic.com>. 10. Форум САПР 2000. - Web: <http://www.fsapr2000.ru>.

N. ILIAS, D.Sc., **I. ANDRAS**, D.Sc., **A. ANDRAS**, D.Sc.,
S. DINESCU, D.Sc. Petrosani, Romania

RELIABILITY ASSESSMENT OF CONTINUOUS MINING TECHNOLOGICAL SYSTEMS

Стаття присвячена аналізу надійності параметрів безперервної системи видобутку з використанням різних підходів з метою виконання швидкої оцінки загальної ефективності встаткування такого роду виробничих систем, як Монте-Карло й стрес-сили втручання.

Статья посвящена анализу надежности параметров непрерывной системы добычи с использованием различных подходов с целью выполнения быстрой оценки общей эффективности оборудования такого рода производственных систем, как Монте-Карло и стресс-силы вмешательства.

Article is devoted to the analysis of reliability of parameters of continuous system of extraction with use of various approaches with the purpose of performance of a fast estimation of general efficiency of the equipment of such industrial systems, as Monte-Carlo and stress-force of intervention.

1. GENERAL REMARKS

The continuous mining production systems consist mainly in a string of equipment starting with winning equipment (shearer loader, in case of underground longwall mining or bucket wheel excavator in case of open pit mining), hauling equipment (armored face conveyor in longwall mining or the on-board belt conveyor in case of excavators), main conveying equipment (belt conveyor in both cases), transfer devices, stock pile or bunker feeding equipment.

This system of mainly serially connected elements is characterized by the throughput (overall amount of bulk coal respectively overburden rock), which is dependent on the functioning state of each involved equipment, and is affected also by the process inherent variability due to the randomness of the cutting properties of the rock.

2. RELIABILITY ANALYSIS BY SIMULATION

In fig 1 the diagram of the monthly production of a bucket wheel excavator based production system operating in a Romanian open pit mine is presented, in comparison with another, presented in fig. 2. The first one has a more intensive operating regime (throughput larger with about 50% then the second one, due to the smaller ratio coal/ overburden produced). Also we can see the breakdown total hours are greater for the first one then the second one, working mainly in overburden rock.

Starting from the main reliability parameters determined on the basis of these recorded data, such as MTBF and MTTR, respectively, λ and μ , the exponential distribution associated parameters, rate of failure and rate of repair, using the Monte Carlo simulation method, we simulated the operating cycles during one month.

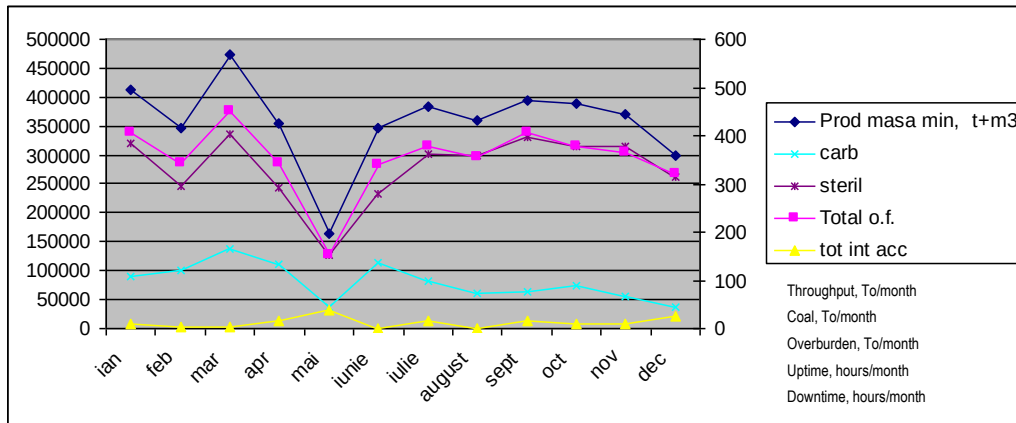


Figure 1 – Operation diagram of the Excavator no. 1

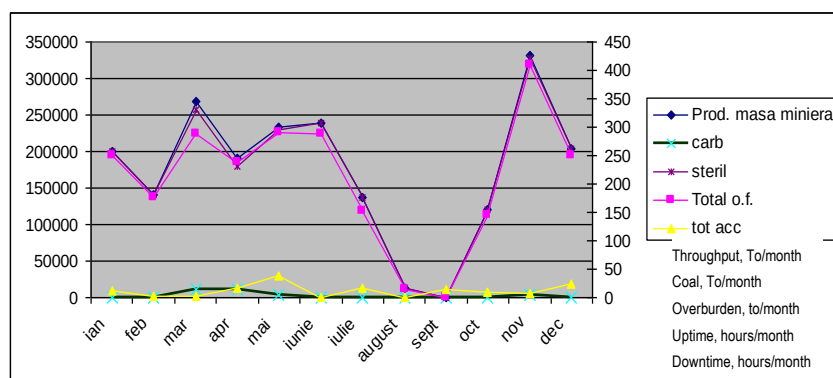


Figure 2 – Operation diagram of the Excavator no. 2

This kind of continuous production system is producing a variable material flow until the breakdown of an element at the moment t_{fi} which causes

the stop of the system. After a certain period of time t_{ru} , the system is repaired and restarts, until the next breakdown is produce at the moment t_{fi+1} .

The production flow can be seen as weighted with a series of Heaviside functions containing binary values 1 and 0, the cadence of breakdowns, the duration of operating times and the duration of repair times being random variables.

The alternating uptimes and downtimes are cumulated until they reach the simulation period T . The simulation is repeated many times using different values for Q_m and σ , describing the variability of the production (fluctuations) and for λ and μ , characterizing the random behavior of the cadence of uptimes and downtimes.

In order to perform simulation, the production flow can be seen as weighted with a series of Heaviside functions containing binary values 1 and 0, the cadence of breakdowns, the duration of operating times and the duration of repair times being random variables.

The alternating uptimes and downtimes are cumulated until they reach the simulation period T . The simulation is repeated many times using different values for Q_m and σ , describing the variability of the production (fluctuations) and for λ and μ , characterizing the random behavior of the cadence of uptimes and downtimes. The simulation model was realized using MathCAD. By processing recorded data, we use the following input figures:

- average monthly production $Q_{\text{month med}} = 357\,400 \text{ m}^3/\text{month}$;
- average hourly production $Q_{\text{hour med}} = 1117 \text{ m}^3/\text{hour}$;
- monthly production standard deviation $\sigma_{\text{month}} = 96\,998 \text{ m}^3/\text{month}$;
- hourly production standard deviation $\sigma_{\text{hour}} = 303 \text{ m}^3/\text{hour}$;
- average monthly operating time $T_{\text{fm}} = 320 \text{ hours /month}$
- working time standard deviation $\sigma_{\text{tf}}=91 \text{ hours}$;
- overall available time $T= 744 \text{ hours}$;
- Breakdown rate $\lambda=1/(320/30) = 0,09375$; repair rate $\mu =0.071$
- Average number of breakdowns $n_{\text{def}} = 30$.

The simulated variability of the production system, with above data, considering breakdown-safe operation is given in figure 3. This case of

simulation has been realized an average hourly production $Q_{\text{med hour}} = 1094 \text{ m}^3/\text{hour}$ and a standard deviation of $\sigma_{\text{hour}} = 302 \text{ t(m}^3\text{)}/\text{hour}$

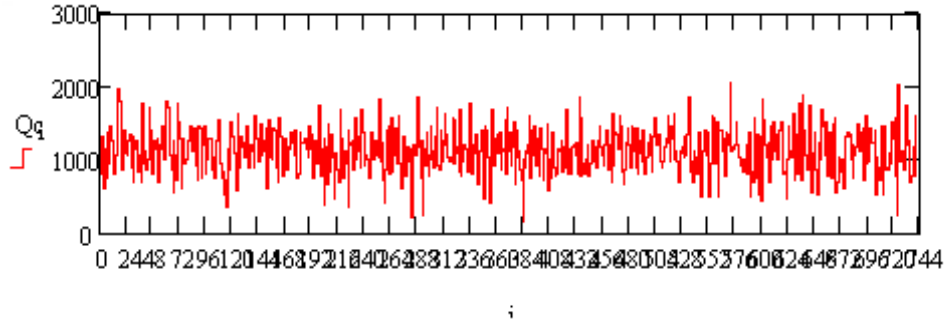


Figure 3 – The inherent production fluctuation over time

Using the exponential distribution law we obtained by simulation the histograms of the distribution of operating and repair times shown in figures 4 and 5.

The state diagram showing the transition cadence from operating to down times and vice versa is presented in fig. 6.

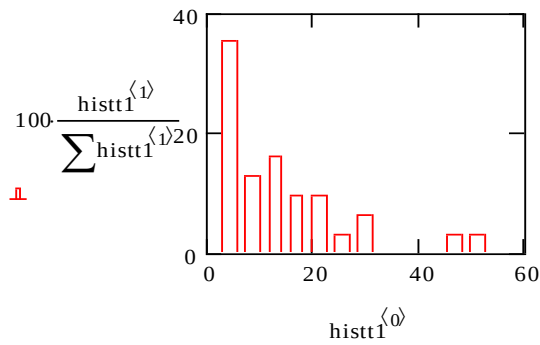


Figure 4 – Histogram of uptimes

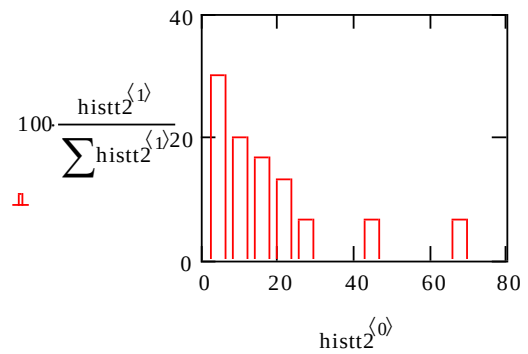


Figure 5 – Histogram of downtimes

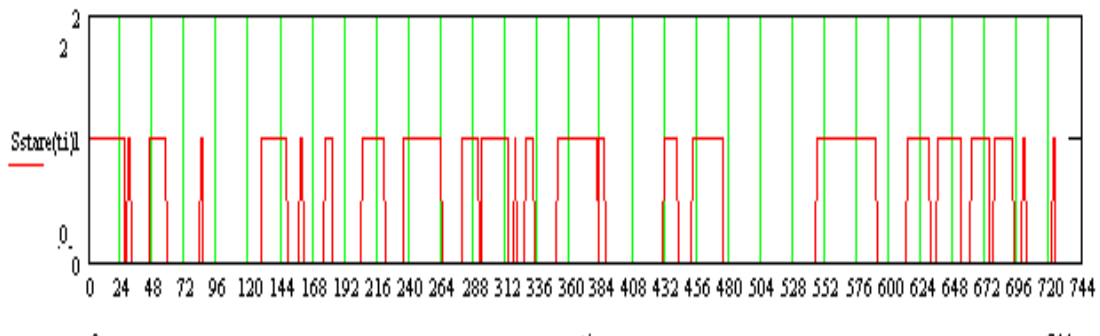


Figure 6 – Simulated state diagram of the system

Superposing the two diagrams (fig 3 and fig 6) we obtain the hourly production diagram which takes into account the up and downtimes, as in fig. 7.

If we realize a number high enough of iterations, by averaging, we obtain the average data near to start input data considered. In this way, we calibrate the model to reflect the actual situation.

Now, we can study different scenarios changing the input parameters, as reduction of the average repair time, or reducing the fluctuation of the production rate.

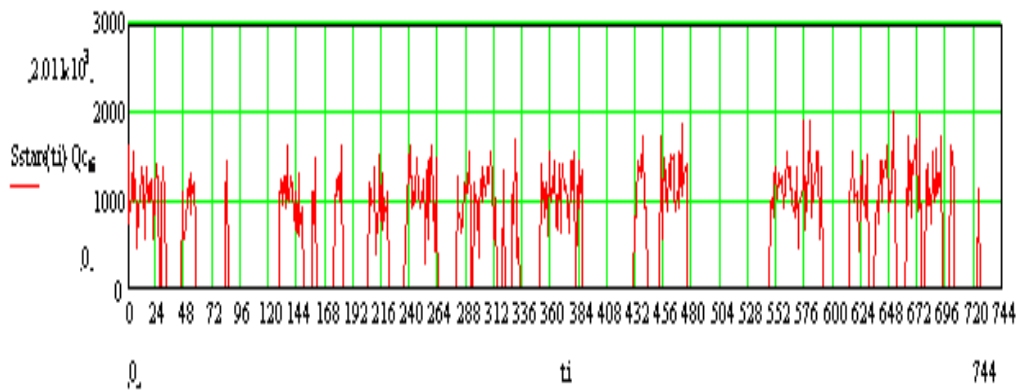


Figure 7 – Diagram of simulated hourly production during 1 month

3. STRESS STRENGTH INTERFERENCE

In the literature, the influence of operating regime, load, stress, requirement, as independent variable, on the safety of work, reliability, probability of failure, and degree of damage of the failure as dependent variable is considered in the conditional reliability theory using the stress-strength interference method. The method is originated in the sizing methods based on probability of the variable loaded systems, as a response to the limits of classical sizing procedures.

In the frame of the classical method, the yield value of strength S and the estimated value of load L are defined. It is presumed that L is always less than S , the difference $S-L$ being called safety range while the ratio S/L is called safety factor.

By designing a system based on this theory, the reliability of a system is considered infinity, and the probability of failure is equal to zero. The failure

occurrence after a time period is considered due to the decrease of S over time due to the fatigue, or the occurrence of an accidental load greater than L .

Mining equipment is facing both causes of probability of failure due to the randomness of the sources of load, accidental overloads and fatigue due to wear of components. We propose and demonstrate the application of this method to the analysis of the safety of operation of mining production systems.

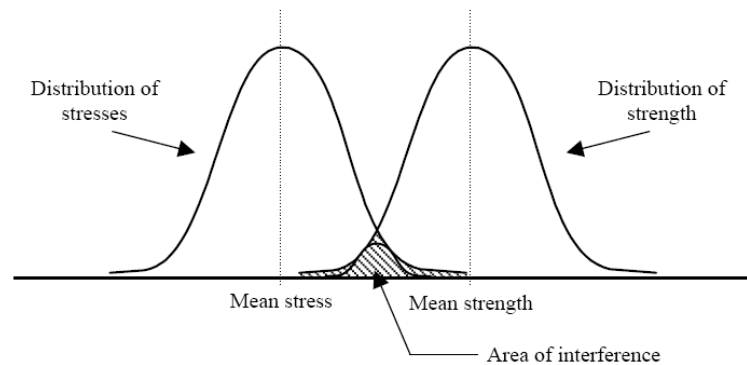


Figure 8 – Principle of the stress-strength interference

In the fig. 8 is presented the principle of the method. The strength S , in general meaning, is a metric of the capacity of a component to resist to loads without damaging, and has not a constant value, being a random variable. On the horizontal axis we have compatible meanings, such as load, requirement, capacity, flow rate, in physical values. On the vertical axis we have probabilities or probability densities, of the occurrence of the given values.

Similarly to strength, the load has also a random variation, so we can represent both distributions on the same picture.

As it can be seen, the two probability fields present an area of interference, which signify that it is possible to existing situations in which the load is greater than the strength. From here it results a third distribution, the probability of the event $L \geq S$, which is the conditional failure probability.

As an example, using a MathCAD program, we drawn up the Load Strength interference diagrams for the Bucket Wheel Excavators discussed before.

In our study, we consider as load the specific cutting energy is considered, which is between 0,08 and 0,4 kWh/ m³ for lignite, with a larger spread of values, respectively 0.18 and 0,2 kWh/ m³ for overburden rock, with narrower spread. As strength, the nominal value of the excavator was considered, as 0.35 kWh/m³, with a normally distributed variability, due to variability of working conditions.

With these values, the Load Strength interference diagrams were drawn up for the two cases, presented in figs. 9 for overburden and 10 for lignite.

As it can be noticed, the degree of non-reliability is greater for the excavator operating in lignite, about 15% , then for the excavator working in overburden, hen is practically zero.

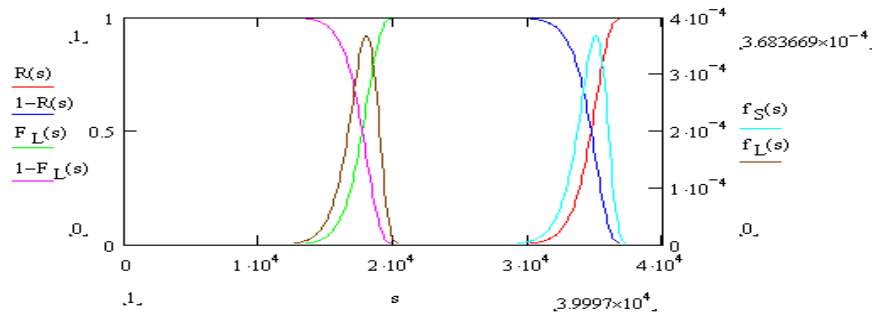


Figure 9 – The L-S interference charts for the excavator working in overburden rock
(Specific energy consumption in kWh/ m3 105 on x axis)

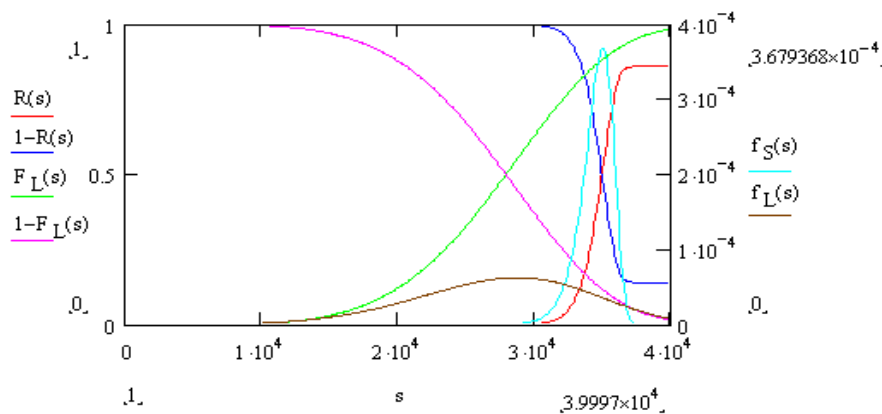


Figure 10 – The L-S interference charts for the excavator working in lignite
(Specific energy consumption in kWh/ m3 105 on x axis)

4. CONCLUSION

In order to find out new methods for the quick assessment of large production systems used in coal mining, we presented and tested by real world examples two alternative – complementary methods of reliability analysis, namely the Monte Carlo simulation and the Load Strength Interference methods. The results obtained are convergent and offer the opportunity for further developments of their application.

References: 1. Kovacs I., Iliáš N, Nan Marin-Silviu Regimul de lucru al combinelor miniere, Editura Universitas, 2000 2. Nan Marin-Silviu Parametrii procesului de excavare la excavatoarele cu rotor, Editura Universitas, 2007 3. Singiresu S. Rao, Reliability-Based Design, McGraw-Hill, 1992.

С. Н. ЛАВРИНЕНКО, канд. техн. наук,

Г. В. КУЛИНИЧ, Харьков, Украина

М. С. САЗОНОВА, канд. физ.-мат наук, Днепропетровск, Украина

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛОЩАДИ СРЕЗА РЕЖУЩИМИ КРОМКАМИ ЛЕЗВИЙНОГО ИНСТРУМЕНТА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВЕЛИЧИНЫ ПОДАЧИ, ГЛУБИНЫ РЕЗАНИЯ И ГЕОМЕТРИИ ЛЕЗВИЯ

У статті представлено моделювання площі зрізу ріжучими кромками лезового інструменту залежно від величини подачі, глибини різання й геометрії леза.

В статье представлено моделирование площади среза режущими кромками лезвийного инструмента в зависимости от величины подачи, глубины резания и геометрии лезвия.

The increasing of contact length of cutting tool edges with change of its cutting part geometry and parameters of cutting essentially influence growth of deformation loadings and size of friction force, and also on increase in a level of arising temperatures accompanying these phenomenon in various points of a contact zone. This article is devoted to modelling and calculation area of cut by the cutting edges for single-point and radius tools depending on feed value and cutting depth.

Величина площади среза режущей кромкой лезвийного инструмента в значительной мере влияет на деформационные напряжения и силы, возникающие в процессе резания [1]. Правильный выбор материала режущего инструмента и его геометрии, а так же таких параметров режима резания, как подача и глубина, позволяют получать стружку с заранее прогнозируемыми параметрами [2, 3, 4], что особенно важно при обработке живой костной ткани. Также появляется возможность более точного анализа пространственного расположения точек приложения нагрузок, действующих на режущую кромку, что важно для проектирования прецизионного лезвийного инструмента.

Целью данной работы является сравнение различных моделей формообразования микропрофиля обработанной поверхности в зависимости от геометрической формы проекций режущей кромки инструмента на основную плоскость. В упрощенной модели рассматриваются две схемы формирования сечения среза. Первая схема предполагает наличие криволинейной режущей кромки с радиусом

различной величины (радиусный инструмент). Вторая схема рассматривает режущий клин, радиус закругления вершины которого настолько мал, что им можно пренебречь (островершинный инструмент). На рис. 1 изображена расчетная схема для определения площади среза радиусной режущей кромкой лезвийного инструмента.

Приведенная расчетная схема соответствует обработке при торцевом фрезеровании фрезой или резцовой головкой оснащенной вставными ножами с криволинейной режущей кромкой. При этом изображены два последовательных положения контура режущей кромки.

Помещаем начало координат в центр первой проекции зуба, то есть в точку O.

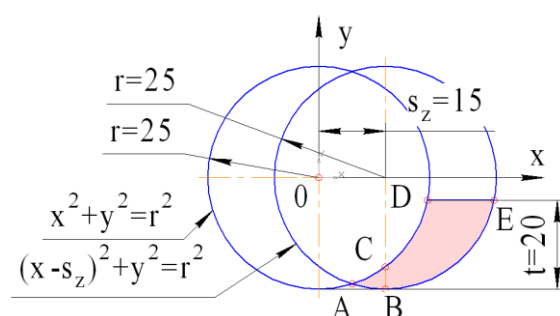


Рисунок 1 – Расчетная схема для определения площади среза радиусной режущей кромкой инструмента

Окружность, которая соответствует криволинейной режущей кромке зуба, находящегося в данном положении, описывается уравнением:

$$x^2 + y^2 = r^2, \quad (1)$$

где: r – радиус кривизны режущей кромки (радиус при вершине), мкм.

Уравнение окружности, соответствующее режущей кромке следующей проекции зуба, может быть записано с учетом подачи на зуб:

$$(x - s_z)^2 + y^2 = r^2, \quad (2)$$

где: s_z – подача на зуб, мкм/зуб; r – радиус кривизны режущей кромки (радиус при вершине), мкм.

Расстояние между центрами окружностей равно величине подачи на зуб. Значение подачи на зуб, радиуса кривизны режущей кромки и глубины резания принимаем произвольно: $s_z=15$ мкм/зуб; $t=20$ мкм; $r=25$ мкм.

Исходя из расчетной схемы, координаты характерных точек будут следующими:

$$A\left(\frac{s_z}{2}; -\sqrt{r^2 - \frac{s_z^2}{4}}\right); B(s_z; -r); C\left(s_z; -\sqrt{r^2 - s_z^2}\right)$$

$$D\left(\sqrt{r^2 - (t-r)^2}; t-r\right); E\left(s_z + \sqrt{r^2 - (t-r)^2}; t-r\right).$$

Для определения площади среза необходимо проинтегрировать уравнения (1) и (2) вдоль оси ОХ, разбивая область интегрирования на две части: от точки А до точки D и от точки D до точки Е. Таким образом, получим выражение:

$$\int_{x_A}^{x_D} (y_{AD} - y_{AE}) dx + \int_{x_D}^{x_E} (t - r - y_{AE}) dx = S_{Cp} \quad (3)$$

Проинтегрировав выражение (3), получаем возможность точного определения значения площади среза в зависимости от подачи, глубины резания и радиуса кривизны режущей кромки. На рис. 2 изображен график зависимости площади среза от величины подачи на зуб, глубины резания и величины радиуса режущей кромки.

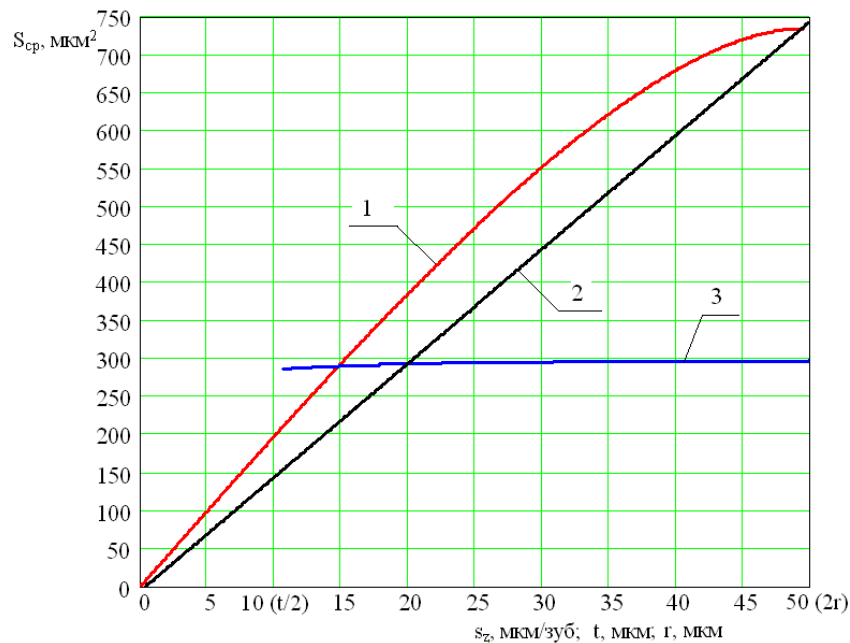


Рисунок 2 – Зависимость площади сечения среза для радиусного инструмента от подачи на зуб, глубины резания и величины радиуса режущей кромки:

1 – Зависимость площади сечения среза от подачи на зуб; 2 – зависимость площади сечения среза от глубины резания; 3 – зависимость площади сечения от величины радиуса режущей кромки.

На начальном участке кривая 1 близка к прямой линии, что указывает на прямопропорциональную зависимость площади среза от

величины подачи, а далее влияние подачи на зуб постепенно снижается. При достижении значения величины подачи $s_z=2r$, площадь среза радиусной режущей кромкой достигает своего максимума и при дальнейшем увеличении подачи не изменяется. При этом глубина впадин достигает значения глубины резания, что является приемлемым во время нарезания круглой резьбы радиусным резцом или при обработке других сложных криволинейных поверхностей.

График зависимости площади среза от глубины резания представляет собой прямопропорциональную зависимость. Глубина резания, при которой площадь среза равна нулю, численно равна высоте микронеровностей. Площадь среза достигает своего максимума при значении глубины резания $t=2r$.

Кривая, описывающая зависимость площади среза от величины радиуса кривизны режущей кромки, начинается в точке, в которой значение радиуса закругления режущей кромки достигает величины, равной половине значения глубины резания.

На рис. 3 изображена расчетная схема для определения площади среза островершинным резцом. Эта схема предполагает отсутствие радиуса при вершине резца или такую его величину, которой можно пренебречь.

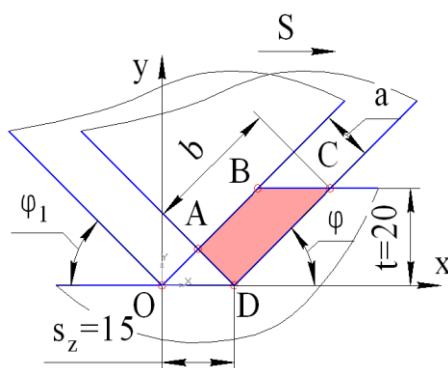


Рисунок 3 – Расчетная схема для определения площади сечения среза островершинным резцом

Контур, замкнутый точками OBCDO, образован наложением на плоскость чертежа двух последовательных положений первого и второго зуба фрезы и представляет собой номинальное поперечное сечение среза S_n . Контур OAD не срезается и остается на поверхности детали в виде гребешков микронеровностей. Этот контур называется остаточным сечением стружки S_Δ [1,3].

Площадь номинального сечения среза рассчитывается по формуле:

$$S_H = s_Z \cdot t \quad \text{мм}^2 \quad (4)$$

Исходя из расчетной схемы, представленной на рис. 3, площадь остаточного сечения определяется по формуле:

$$S_{\Delta} = \frac{a \cdot OA}{2} = \frac{s_Z^2 \cdot \sin \varphi \cdot \sin \varphi_1}{2} \quad \text{мм}^2, \quad (5)$$

где: a – толщина среза, мм; φ – главный угол в плане, град.; φ_1 – вспомогательный угол в плане, град.

Графики зависимостей площади остаточного и действительного сечения среза от подачи на зуб и глубины резания изображены на рис. 4. Действительная площадь среза, соответствующая контуру ABCD и рассчитывается по формуле:

$$S_D = S_H - S_{\Delta} = s_Z \cdot t - \frac{s_Z^2 \cdot \sin \varphi \cdot \sin \varphi_1}{2} \quad \text{мм}^2 \quad (6)$$

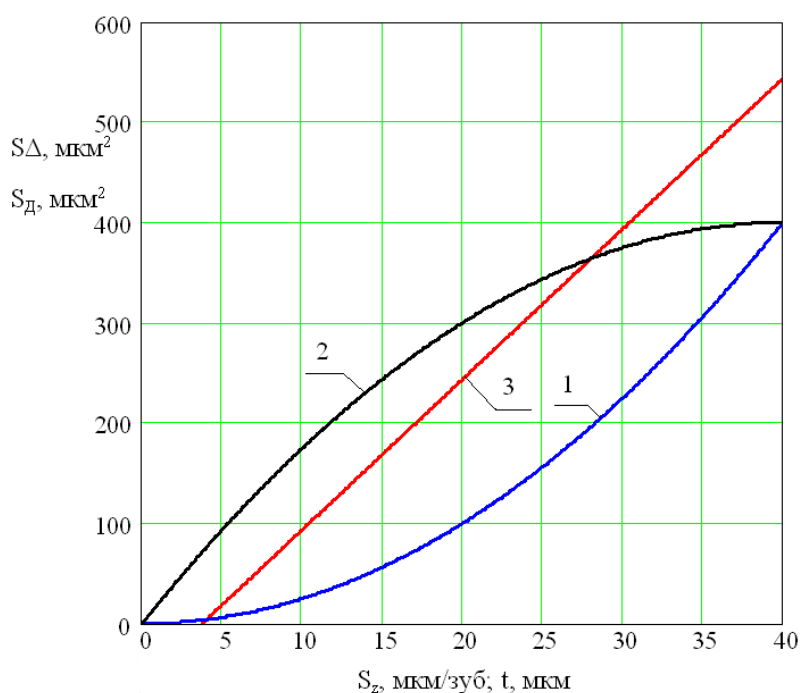


Рисунок 4 – Зависимость площади сечения среза от параметров резания:

- 1 – зависимость площади остаточного сечения среза от подачи на зуб;
- 2 – зависимость площади действительного сечения среза от подачи на зуб;
- 3 – зависимость площади действительного сечения среза от глубины резания.

Кривые 1 и 2 на рис. 4 выходят из начала системы координат и совпадают в конечных точках. При этом подача на зуб достигает такого

значения, при котором площадь остаточного и действительного сечения среза становятся численно равными между собой. При этом глубина впадин, которые оставляет режущий инструмент, будет равной величине глубины резания. Очевидно, что это происходит при нарезании резьбы резьбовым резцом или при обработке других сложных фасонных поверхностей. Как видно из кривой 3 графика, представленного на рис. 4, действительное сечение среза равно нулю при таком значении величины глубины резания, при котором площадь номинального сечения среза будет равна площади остаточного сечения среза.

Выводы:

1. Создана модель для расчета площади сечения среза режущими кромками лезвийного инструмента в зависимости от величины подачи на зуб, глубины резания и геометрии лезвия, которая позволяет количественно оценивать степень влияния параметров режима резания и геометрическую форму режущей кромки на величину площади сечения среза, определять положение точек приложения силы резания и прогнозировать параметры формируемой стружки.

2. Следует отметить, что при одинаковых постоянных заданных параметрах режима резания площадь действительного сечения среза для радиусного инструмента будет заметно больше площади действительного сечения среза для островершинного инструмента.

3. На величину площади сечения среза в большей степени влияет изменение параметров режима резания, а величина радиуса закругления режущей кромки влияет в меньшей степени.

Список литературы: 1. Грановский Г.И., Грановский В.Г. Резание металлов: Учебник для машиностр. и приборостр. спец. вузов. – М.: Высш. шк., 1985. – 304 с. 2. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов. М.: «Машиностроение», 1975.- 457 с. 3. Шнур Г., Штеферле Т. Справочник по технологии резания металлов в 2-х том./ Пер. с нем. В. Ф. Колотенкова и др.; Под ред. Ю. М. Соломенцева. – М.: Машиностроение, 1985. – 616 с. 4. Кундрак Я. Интенсивность износа и стойкость резцов из ПСТМ при растачивании закаленных сталей // Резание и инструмент в технологических системах. Сб. научн. тр. Вып. 53, С. 93-99, 1999. 5. Кувшинский В.В. Фрезерование. М.: «Машиностроение», 1977. – 240 с.

А. Е. ПРОВОЛОЦКИЙ, д-р техн. наук,
П. С. ЛАПШИН, Днепропетровск, Украина

ШАРОВЫЕ ПОЛИМЕРЫ В ТЕХНОЛОГИИ СТРУЙНОЙ ОБРАБОТКИ

У статті приведені результати досліджень струмінної обробки та використання кульових полімерних матеріалів, які накопичують електростатичні заряди. При контакті куль з оброблюваною поверхнею вони утворюють необхідний мікрорельєф.

В статье приведенные результаты исследований струйной обработки и использование пулевых полимерных материалов, которые накапливают электростатические заряды. При контакте шаров с обрабатываемой поверхностью они образуют необходимый микрорельеф.

In the article the resulted results of researches of jetting treatment and uses of bullet polymeric materials, which accumulate electrostatic charges. At the contact of bullets with the processed surface they form necessary microrelief.

Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными и практическими задачами.

В реализации поставленных задач решающая роль принадлежит применению прогрессивных технологий, к которым относится и технология чистовой обработки деталей машин с использованием эффекта ударно-импульсного действия на поверхность потока свободного абразива. Этот эффект используется при разработке разнообразных схем струйно-абразивной обработки.

Струйно-абразивная обработка находит широкое применение при очистке заготовок от окалины, чистовой доводке деталей, в том числе и сложной формы. При этом значительно сокращается трудоемкость технологических процессов, и повышаются эксплуатационные показатели обработанных поверхностей.

Особое строение микрорельефа поверхностей, обработанных потоком свободного абразива, позволяет рекомендовать струйно-абразивную обработку для поверхностей пар трения, пресс-форм и штампов, заготовок перед нанесением различных видов покрытий, прокатного инструмента и оснастки.

Технологические параметры выбираются с учетом физических свойств и исходной шероховатости обрабатываемых поверхностей, при этом учитываются эксплуатационные показатели применяемых суспензий.

Важным фактором является выбор абразивного материала. При всех положительных показателях струйной абразивной обработке имеется отрицательный фактор разрушения абразивных частиц при их соударении с обрабатываемой поверхностью, это приводит к снижению производительности обработки и недостаточное снижение шероховатости детали. Многие указанные отрицательные факторы были исследованы и изложены в монографиях [1], но не было исследования использования абразивных частиц, которые могли бы накапливать электростатические заряды, а после разрядов вели обработку с получением микрорельефа.

Постановка задачи нового исследования. Провести поиск и исследования шаровых полимерных частиц, которые могли бы заменить такие дорогостоящие абразивные материалы как алмаз, карбид кремния, электрокорунды и другие.

Полимерные материалы используются в промышленности, в основном, для производства различных изделий химической промышленности. Известно, что при переработке и эксплуатации изделий из полимерных материалов огромное значение уделяется устранению электростатических зарядов, являющихся причиной брака продукции, резкого снижения скорости работы машин и аппаратов. Кроме того, искровые разряды статического электричества могут вызывать взрывы и воспламенение горючих жидкостей, огнеопасных газовых смесей, пыли. Электризация полимерных материалов приводит к сильному загрязнению их поверхности и может также увеличивать скорость деструкции полимеров, сопровождающуюся выделением токсичных веществ. Поэтому применение полимерных материалов в качестве наполнителей струи при струйной обработке ограничено, а там где все же применяют обработку в таком виде, обязательно используют устройства для снятия статического заряда.

Электростатические заряды возникают в полимерах при их трении или разрыве контакта как с проводящими материалами, так и с диэлектриками. Хорошая статическая электризация полимеров является следствием их высоких диэлектрических свойств. Важнейшей, характеристикой электризации полимеров является среднеквадратичный полупериод утечки электростатического заряда (T_{mrs}), который измеряется в секундах. Считается, что материал плохо электризуется при <10 сек., т.е. имеет высокие антистатические свойства. При температуре 21°C и относительной влажности воздуха 65% некоторые полимер имеют значения T_{mrs} приведенные в таблице 1

Таблица1 – Значения T_{mrs} некоторых полимеров, сек.

Поли-N-винилимидазол.	0.19
Поливинилпентаметилфосфорамид	0,2
Полистиролосульфонат натрия	0,30
Полидиметилакриламид	0,58
Полиакриловая кислота	1,30
Полиэтиленосульфонат натрия	2,00
Полиакриламид	3,46
Поливинилфторид	8,40
Поливиниловый спирт	1389,00
Полистирол, поливинилхлорид	8000,00

Из представленной таблицы можно сделать вывод, что полистирол, поливинилхлорид и их производные имеют большое время релаксации гомозаряда. Применительно к рассматриваемому процессу это означает что заряды, приобретенные отдельной сферой в элементарных актах механического взаимодействия с другими сферами и стенками эжекционного шланга и сопла, будут спадать очень медленно и поэтому будут суммироваться. Рост заряда на сферах происходит до достижения критической напряженности электрического поля, при которой происходит пробой окружающего воздуха.

Другой характеристикой электризации полимеров является объемное электрическое сопротивление (P_v). Практически не электризуются материалы, у которых P_v не превышает 10^8 Ом•м. Полимерные же материалы имеют более высокое значение P_v находящееся для различных полимеров в диапазоне 10^{10} – 10^{16} Ом • м.

Проводились исследования возможностей применения сополимеров стирола, характеризующихся по сравнению с полистиролом лучшими механическими и диэлектрическими свойствами.

Причина увеличения ударной прочности сополимеров заключается во введении сшивающего агента, которым в данном случае является дивинилбензол. По одной из существующих гипотез, частицы микрогеля способны снижать концентрацию напряжений, возникающих на конце трещины, растущей под действием ударной нагрузки. Сравнивая, ударопрочный полистирол с выбранными сополимерами стирола обнаруживаем, что последние имеют ударную прочность большую в среднем на 65% и меньшее относительное удлинение в среднем на 25%. Эти данные подтверждаются экспериментально. Стойкость сополимеров к разрушению значительно выше, чем у полистирола, что позволяет использовать их многократно, тем самым снижая расходы, связанных с

закупкой материала для обработки. Диэлектрические свойства сополимеров стирола значительно лучше, чем у полистирола. Удельное объемное электросопротивление составляет 10^{16} против 10^{14} Ом•м у полистирола, а тангенс угла диэлектрических потерь при частоте 1МГц – 0,0004 против 0,0007, что позволяет утверждать о большей электризации сополимеров стирола.

Таким образом, в дальнейших исследованиях в качестве наполнителя струи использовались сополимеры стирола, у которых хорошие механические свойства сочетаются с лучшими, из всех полимеров диэлектрическими свойствами.

Особую актуальность приобретает применение струйной обработки для снятия старых лакокрасочных покрытий, а также для подготовки поверхности к нанесению новых покрытий. Применение струйной обработки с полимерными наполнителями струи (сопровождающееся электрофизическими эффектами) позволяет получать наилучшее качество поверхности перед окраской, соответствующее высочайшим стандартам [2].

При использовании эжекционного способа подачи абразивного материала диэлектрические гранулы, например, полистирола, двигаясь по шлангу, входят в контакт с его внутренними стенками. В результате трения гранул о стенки резинового шланга и между собой, гранулы заряжаются электрическим зарядом.

Двигаясь по каналам струйного аппарата, часть зарядов гранулы отдают металлическим поверхностям аппарата.

Так как аппарат не связан с основной массой установки и землей, то заряды деталям аппарата будут передаваться до насыщения, а затем потеря зарядов прекратится. Заряженные частицы, выходя из струйного аппарата, направляются на обрабатываемую поверхность. При соударении заряженных частиц с обрабатываемой поверхностью появляются искровые заряды. При искровых разрядах поверхностный слой детали подвергается интенсивной эрозии. В месте образования единичного искрового разряда на поверхности детали остается эрозионная лунка. К электрической эрозии добавляется удар частиц, и интенсивность разрушения еще более увеличивается, а шероховатость поверхности за счет ударов гранул уменьшается.

Таким образом, имеет место комбинированный способ обработки: поверхностный слой заготовки одновременно разрушается за счет искрового разряда и удара твердой частицы. При обработке особо твердых заготовок струйная обработка абразивными частицами практически не

осуществляется из-за дробления частиц, тогда как при обработке заряженными частицами процесс электрической эрозии сопровождается нагревом микрообъемов металла, причем тех, которые будут подвергнуты последующему ударному воздействию частиц. Поэтому, преобладающим видом разрушения является электростатическая эрозии. Разрушение материала за счет ударного воздействия полимерных частиц невелико и несоизмеримо с электроискровым износом.

В некоторых случаях наблюдается такой недостаток как возникновение в поверхностном слое напряжений растяжения. Частицы сополимеров стирола могут накапливать значительные заряды (сотни и даже тысячи вольт). При разряде возникают эрозионные эффекты с появлением глубоких лунок, т.е. шероховатость поверхности резко ухудшается. При обработке тонкой фольги искровые разряды прожигают заготовку насквозь.

Нагретые микрообъемы легче деформируются при ударном воздействии частиц, т.е. электрической эрозии подвергаются тела любой твердости.

Электрическая природа процесса разрушения подтверждается как электрическими разрядами, наблюдающимися в рабочей камере и зарядением обрабатываемых деталей, так и морфологией обработанной металлической поверхности, типичной для электроискровой обработки, а также тем обстоятельством, что твердость используемых полимеров намного меньше твердости металла на котором при обработке возникают эрозионные лунки.

Электрический разряд в твердых, жидких и газообразных диэлектриках (пробой) наступает при некоторой присущей данному материалу напряженности электрического поля в результате ударной ионизации атомов (молекул) диэлектрика электронами, что приводит к образованию электронных лавин, а затем к быстрому прорастанию стримера – канала, в котором вещество сильно ионизировано. Различают три основные формы пробоя:

1. Электрический пробой, который обусловлен чисто электрическими процессами (лавинообразное нарастание носителей заряда вследствие ионизации электронным ударом) и развивается за сравнительно короткий промежуток времени $10^{-5} - 10^{-9}$ с.

2. Тепловой пробой – возникает на фоне резкого роста тепловыделения в диэлектрике за счет диэлектрических потерь и роста электропроводности.

3. Электрохимический пробой (электрическое старение) – развивается в течение длительного промежутка времени при неизменном поле с напряженностью ниже электрической прочности материала на фоне изменения химического состава и структуры диэлектрика. Примером может служить прораствание дендридовидных проводящих каналов – водных триингов. Образующееся в месте пробоя отверстие, которое зачастую имеет ветвистое строение, называется каналом разряда. Канал разряда не всегда бывает сквозным. При неполном пробое он не имеет выходного отверстия.

Проведенные в проекте измерения тока утечки при обработке металлической поверхности струей полимерных сфер (металлическая пластина была заземлена через наноамперметр) показывают, что этот ток весьма мал – 10^{-7} – 10^{-8} А. Таким образом имеет место самоограничение интегрального разрядного тока. Разумно предположить, что при столь малых токах во внешней цепи, в покрытии развивается чисто электрическая форма пробоя.

Анализ литературы и экспериментальных данных показывает, что электрическое заряджение полимерных диэлектриков (изоляторов), без приложения внешнего электрического поля в результате механических воздействий, может происходить вследствие следующих явлений:

1. Трибоэлектрический эффект, возникающий при трении диэлектрика по диэлектрику и по металлу (проводнику). В основе трибоэлектрического эффекта лежит переход электронов от материала с меньшей к материалу с большей работой выхода электрона при их контакте. Механическое трение способствует увеличению эффективной площади контакта и позволяет наблюдать электрическое заряджение при взаимном трении тел, состоящих из одного материала, так как трущиеся тела будут, как правило, иметь разные температуры в области контакта и электроны будут переходить от более нагретого к менее нагретому телу.

2. Заряджение твердых тел при их деформации. Экспериментально доказано, что заряджение полимеров при деформации зависит от их физического состояния – они заряжаются, если находятся в стеклообразном состоянии и не заряжаются, если находятся в высокоэластичном состоянии.

В связи с этим заряджение полимерных сфер происходит, по-видимому, как в результате трибоэлектрического эффекта, так и в результате их деформации в момент удара по обрабатываемой детали. В трибозаряджении имеет смысл выделить три компонента:

а) заряджение в результате трения сфер об эжекционный шланг, изготовленный из диэлектрика – резины;

б) заряджение в результате трения сфер о выходное сопло, изготовленное из проводника – стали;

в) заряджение в результате трения друг о друга сфер, имеющих разные скорости движения.

Начальная проверка гипотез проведена на специально разработанном стенде.

Ранее выполненные исследования указывают на большое время релаксации гомозаряда и большую энергию активации этого процесса для высокоомных полимерных диэлектриков, к которым относится, судя по его диэлектрическим характеристикам, выбранный нами полимер. Применительно к рассматриваемым процессам это означает, что заряды, приобретенные отдельной сферой в элементарных актах механического взаимодействия с другими сферами и стенками шланга и сопла, будут спадать очень медленно и поэтому будут фактически суммироваться. Естественным ограничением процесса роста заряда на сферах является электрический разряд - пробой окружающего воздуха при достижении критической напряженности электрического поля, которая определяется законом Пашена.

Учитывая, что в потоке полимерных сфер до момента их подлета к обрабатываемой поверхности происходит большое число актов их взаимодействия между собой и стенками струйного аппарата, можно в первом приближении считать сферы в момент их подлета к обрабатываемой поверхности равномерно заряженными. В этом случае с приближением сферы и обрабатываемой поверхности напряженность поля (E), создаваемого зарядом этой сферы вблизи этой поверхности, растет по закону [3]:

$$E = \frac{\sigma \cdot R^2}{\varepsilon \cdot r^2}, \quad (1)$$

где σ – поверхностная плотность заряда на сфере,

R – радиус сферы,

r – расстояние от центра сферы до рассматриваемой точки (в данном случае до обрабатываемой поверхности),

ε – электрическая постоянная.

Большой объем исследований был посвящен выбору диаметра частиц.

Для обработки диэлектрических лакокрасочных покрытий готовили абразивную массу, состоящую из сферических шариков сополимера стирола зернистостью 0,2-0,45 мм. При движении к обрабатываемой поверхности частицы сополимера стирола трутся о стенки резинового шланга и получают заряд, который зависит от соотношения между скоростью трения и величиной удельного поверхностного сопротивления [4]. Достигая поверхности заготовки частицы разряжаются, разрушая диэлектрические лакокрасочные покрытия за счет электрической эрозии. Ударное действие частиц таких размеров (0,2-0,45 мм) невелико, поэтому электрическая эрозия является основным видом разрушения.

Напряжения, возникающие при электрической эрозии имеют знак противоположный тому, который появляется при ударном воздействии шариков на обрабатываемую поверхность. При использовании шариков диаметром 0,2-0,45 мм эти напряжения уравнивают друг друга. Поэтому коробления сведены к минимальным.

Заряд в таких частицах используется полностью, т.е. за короткое время удара частица успевает, благодаря своим малым размерам, полностью разрядиться. То есть более полно используется энергия заряженных частиц. При использовании шариков сополимера стирола в диапазоне (0,2-0,45 мм) возникает напряженность электрического поля, достаточная для пробоя многослойных диэлектрических лакокрасочных покрытий, несмотря на малую мощность заряда шарика. Мощность заряда такая, что не вызывает на поверхности металла электроэрозионным лунок и не увеличивает шероховатость очищенной поверхности. При меньшем объеме шарика и, следовательно, меньшем заряде напряженность электрического поля достаточна для пробоя многослойных диэлектрических лакокрасочных покрытий, так как уменьшается радиус шарика.

При диаметре шариков сополимера стирола 0,2-0,45 мм Напряжения сжатия возникающие при механическом ударе уравниваются напряжениями растяжения в результате электрических разрядов; и заготовки не подвергаются короблению.

Характер контакта шарика сополимера стирола с обрабатываемой поверхностью, благодаря упругопластическим свойствам шарика, представляет собой небольшую площадь, размеры которой зависят от диаметра шарика и энергии механического удара. Поэтому электрический пробой многослойных диэлектрических покрытий можно рассматривать как пробой в конденсаторе, который происходит в одной точке. При этом использование шариков сополимера стирола диаметром 0,2-0,45 мм

позволяет увеличить производительность, т.к. суммарное накопление зарядов в этих шариках больше чем в шариках диаметром более 0,45 мм. А так как при меньших размерах на единице площади может поместиться больше шариков, чем при больших размерах, то возрастает и количество разрядов на единицу площади. Суммарный электрический заряд потока шариков меньшего диаметра больше [4]. Следовательно на одной и той же площади обработки применение шариков меньшего диаметра по сравнению с большими шариками вызывает более интенсивный съем диэлектрических покрытий без повреждения поверхности основного металла. При этом, экспериментально установлено, что наибольшая эффективность разрушения покрытий наблюдается при размерах частиц 0,2 мм.

При выборе частиц сополимера стирола диаметром менее 0,2 мм количество частиц в единице объема движущейся массы будет настолько большим, что частицы друг друга экранируют от контакта со стенками резинового шланга. Кроме того, экранирующий эффект проявляется при соударении с обрабатываемой поверхностью, что вызывает резкое уменьшение производительности процесса съема диэлектрических покрытий. При этом преобладающим будет разрушение диэлектрического лакокрасочного покрытия от электрической эрозии, и на металлической поверхности возникают напряжения растяжения.

Максимальный размер частиц (0,45 мм) установленный экспериментально, обусловлен тем, что частицы диаметром более 0,45 мм при соударении отдают не весь заряд из-за кратковременности соударения [4].

Очевидно, что разрушение лакокрасочного покрытия происходит в результате множественных пробоев, приводящих к потере покрытием механической прочности, с последующим механическим срывом и уносом ослабленных участков покрытия потоком сфер. Однако, не вполне ясно посредством каких именно механизмов формируются электрические поля, превышающие электрическую прочность покрытия (E_{np}) необходимую для развития пробоя.

Как было отмечено выше, заряд, который несет на себе отдельная сфера не может превышать определенного значения, при котором возникает пробой окружающего воздуха. Электрическая прочность воздуха в однородном поле равна 3,2 МВ/м, а электрическая прочность большинства полимерных материалов, в том числе и лакокрасочных покрытий составляет десятки МВ/м. Поэтому заряд, который приносит на себе отдельная сфера при полете к детали явно недостаточен для

формирования пробоя. В этой связи можно предположить, что реализуется один из приведенных механизмов, или их комбинация.

1. При механическом ударе сферы об обрабатываемую поверхность на ней в результате деформации возникает дополнительный заряд, величина которого в сумме с трибозарядом достаточна для создания поля с $E > E_{np}$.

2. Сферы при механическом ударе передают часть переносимого ими заряда гетерогенному слоистому диэлектрику, который представляет собой лакокрасочное покрытие. При накоплении заряда достаточной поверхностной плотности (σ) напряженность поля (E) достигает электрической прочности покрытия (E_{np}) и возникает пробой:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}. \quad (2)$$

3. Заряженные сферы при их механическом ударе об обрабатываемую поверхность создают электрические импульсы, величина которых хоть и недостаточна для формирования пробоя, но вызывает частичные разряды в дефектных местах покрытия (например, в микропорах). Электрическое старение совместно с механическими ударами разрушает покрытие.

Для уточнения и развития количественной физической модели процесса были проведены необходимые измерения толщин, электрической прочности E_b , диэлектрической проницаемости ε , диэлектрических потерь $tg\sigma$ и удельного объемного сопротивления ρ различных слоев лакокрасочных покрытий используемых в авиационной промышленности. Исследованы два типа лакокрасочных покрытий. В обоих случаях лакокрасочные покрытия состоят из трех слоев: грунтовки типа АК-070, нитроэмали типа ХВ-16 или АС-131 и защитного лака типа ЛС-16. Образцы для исследований изготавливали путем нанесения слоев грунта, эмали и лака по отдельности и в обычной комбинации на алюминиевую фольгу имеющую высокую равномерность по толщине. Толщину покрытий определяли с помощью микрометра типа 1МИГ с точностью 1 мкм. Пробой производили на фронте стандартного импульса (1,25/50 мкс). Диэлектрическую проницаемость и $tg\sigma$ определяли мостовым методом а удельное объемное сопротивление по трехэлектродной схеме при $E=0,5$ МВ/м. При определении электрической прочности и толщины лакокрасочных покрытий (h) для каждого материала производили в среднем по 300 замеров(рис. 1).

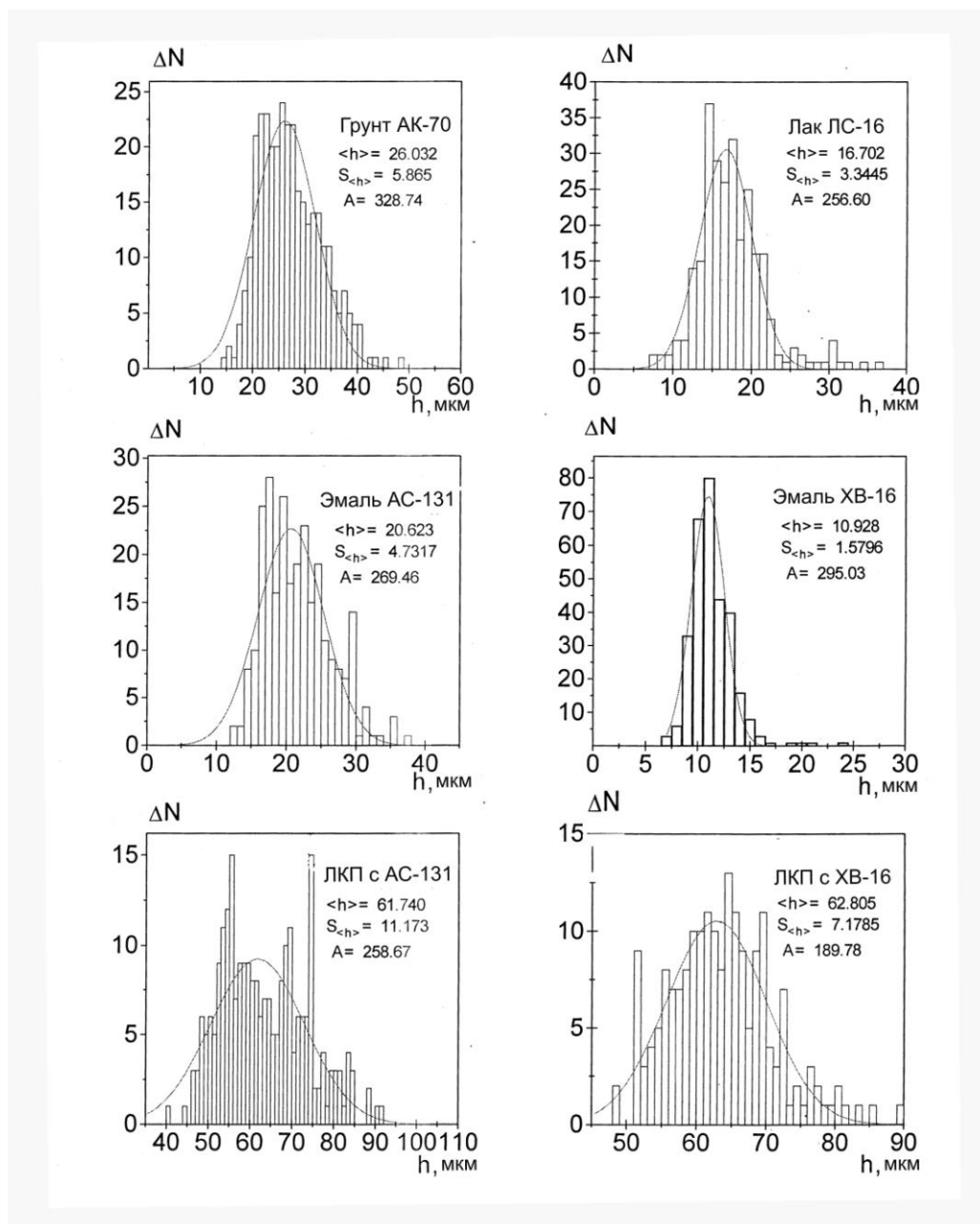


Рисунок 1 – Гистограмма толщины лакокрасочных покрытий и их элементов

Из представленных на рис.1 гистограмм толщины следует, что все слои за исключением эмали ХВ-16 заметно неравномерны по толщине. Графики аналитических зависимостей $E_b(h)$ для лакокрасочных покрытий и их различных слоев, удовлетворительно аппроксимирующие экспериментальные точки и наложенные на облака этих точек, представлены на рис. 2. Большой разброс значений E_b для эмали ХВ-16 обусловлен по-видимому ее неоднородностью, что проявляет себя и в технологическом аспекте, приводя к неодинаковой производительности при одинаковых режимах обработки.

Полученные результаты (рис.2) отражают электрическую прочность лакокрасочных покрытий, что позволяет оценить метрическую напряженность поля, необходимого для развития пробоя.

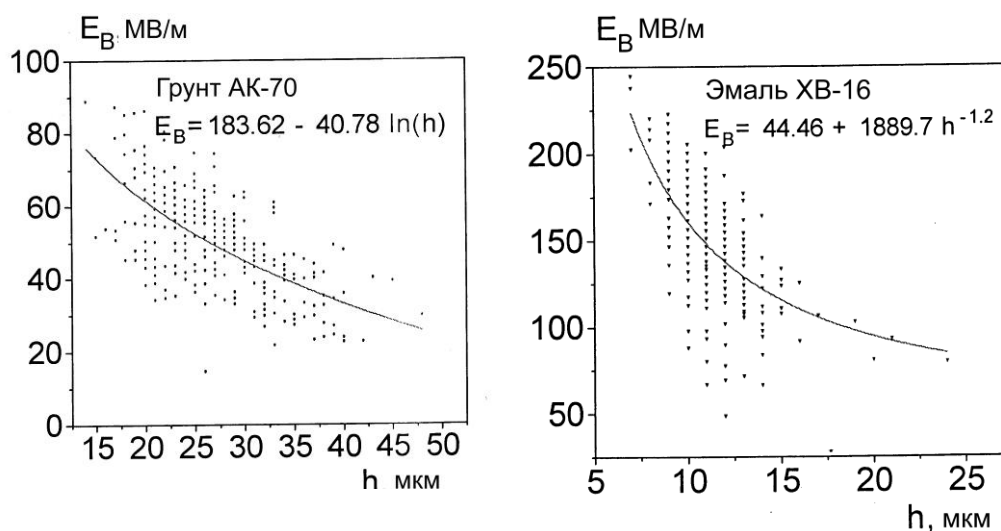


Рисунок 2 – Зависимость электрической прочности лакокрасочных покрытий и их элементов от толщины

Перспективы дальнейших исследований.

Планируется провести следующие эксперименты:

1. Раздельное определение величин плотности зарядов, возникающих на сферах в результате трибоэлектрического эффекта и их деформации, в процессе моделирования этих процессов на отдельных сферах и плоских образцах полимера, из которого изготавливают рабочие сферы.

2. Интегральное определение заряда сфер до и после их соударения с поверхностью обрабатываемой детали в реально работающей установке с помощью цилиндра Фарадея.

3. Экспериментальное моделирование одиночных актов взаимодействия сфер с чистой и покрытой диэлектрическим материалом металлической поверхностью, с целью определения амплитуд и длительности возникающих импульсов тока и напряжения.

4. Оценка тепловыделения в процессе струйной обработки поверхностей потоками полимерных частиц.

Список литературы: 1. Проволоцкий А.Е. Струйно-абразивная обработка деталей машин. –К.:Тэхника, 1989.–277 с. 2. Andziak Janusz, "Eksplot i dozor", 1980, 9, №10, 24–25 (Польша). 3. Кошкин Н.И., Ширкевич М.Г. Справочник по элементарной физике. М. "Физматгиз", 1962. 4. Василенок Ю.И. Защита полимеров от статического электричества. Л. "Химия", 1975.

О.А. РОЗЕНБЕРГ, д-р техн. наук, **С.Ф. СТУДЕНЕЦ**,
В.В. МЕЛЬНИЧЕНКО, Киев, Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОМБИНИРОВАННОГО ПРОТЯГИВАНИЯ ГИЛЬЗ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ ИЗ АНТИФРИКЦИОННЫХ ЛЕГИРОВАННЫХ ЧУГУНОВ

В статті наведені результати експериментальних досліджень комбінованого протягування гільз двигунів внутрішнього сгорання, виготовлених з антифрикційних легированих чавунів марок АХНМГ, АХНМД.

В статье приведенные результаты экспериментальных исследований комбинированного протягивания гильз двигателей внутреннего сгорания, изготовленных из антифрикционных легированных чугунов марок АХНМГ, АХНМД.

In article results of experimental researches combined broaching sleeves of the internal combustion engines made from antifrictional irons of marks АХНМГ, АХНМД are presented.

Резание материалов, несмотря на высокую трудоемкость и себестоимость, остается универсальным и наиболее востребованным методом механической обработки. Развитие и совершенствование прогрессивных альтернативных способов производства изделий машиностроения, таких как порошковая металлургия, литье под давлением, сварка и другие, не привели к принципиальному снижению объема лезвийной обработки, доля которой в общей стоимости готового изделия стабильно удерживается на уровне 30...60 %.

Обеспечение качества и производительности лезвийной обработки концентрируется вокруг ряда проблем, которые в научном и техническом плане продолжают оставаться злободневными. К этим проблемам в первую очередь можно отнести повышение прочности, стойкости и надежности металлорежущего инструмента. Решение таких задач имеет растущую актуальность в связи с постоянным увеличением стоимости компонентов инструментальных материалов, широким использованием в машиностроении жаропрочных и труднообрабатываемых материалов, внедрением высокоскоростных методов механической обработки и

ужесточением общих требований к точности обработки и качеству поверхностей деталей машин.

В настоящее время в двигателестроении, находят широкое применение новые антифрикционные, легированные чугуны марок АХНМГ, АХНМД, применяемые для изготовления гильз тепловозных двигателей. Твердость таких чугунов находится в диапазоне 220–300 НВ. В сочетании с другой, не менее важной, особенностью, оказывающей существенное влияние на выбор вида механической обработки гильз тепловозных двигателей, являются их размеры: внутренний диаметр – 190–300 мм, наружный диаметр – 250–370 мм, длина 540–1200 мм. Таким образом, возникает некоторое противоречие между достаточно нежесткой формой детали и такими свойствами материала как сравнительно высокая твердость и низкая пластичность, поскольку такие чугуны имеют перлитную или бейнитную (перлитно-аустенитную) структуру.

В современном двигателестроении эта проблема решена следующим образом. Для обработки отверстий в гильзах двигателей внутреннего сгорания из легированных чугунов применяют четыре основных технологических операции:

- черновое растачивание на горизонтально-расточных станках;
- алмазное растачивание на вертикальных алмазно-расточных станках;
- черновое хонингование;
- чистовое хонингование.

Процесс алмазного растачивания характеризуется низкой производительностью (путь резания от 3500 до 6500 м, в зависимости от выбранного режима точения, на длине детали 540 мм), нестабильностью качественных показателей обработанной поверхности и значительными затратами на инструмент из сверхтвердых материалов, который быстро изнашивается в условиях обработки легированного чугуна.

Результаты анализа литературных источников по теме исследований показал, что процесс протягивания отверстий больших диаметров в деталях из малопластичных материалов, в том числе высоколегированных чугунов, не только не применяется в производстве, но и практически не изучен. Также, необходимо отметить, что существующие технологические решения, рекомендации и инструмент, которые используются для протягивания внутренних полостей в деталях из малопластичных материалов, являются неприемлемыми при применении комбинированного протягивания для обработки больших отверстий в изделиях типа "гильза" из антифрикционных, легированных чугунов. Приведенные в литературе результаты исследований

не дают возможности определять с необходимой точностью параметры поверхностного слоя обработанной поверхности детали на стадии проектирования технологической операции, так как такие виды механической обработки, как режущее и деформирующее протягивание, а также их комбинации не рассматривались, как перспективные для обработки внутренних полостей гильз тепловозных двигателей.

Перечисленные факторы и обуславливают актуальность исследований, направленных на поиск эффективных методов и схем обработки крупногабаритных гильз из специальных марок чугунов.

В Институте сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины были проведены предварительные экспериментальные исследования применения различных схем комбинированного протягивания и вариантов конструкций инструмента для обработки отверстия диаметром 261 мм в гильзе длиной 542 мм. Анализ результатов эксперимента [1], позволяет сделать вывод о перспективности использования комбинированного протяжного инструмента для обработки полостей в крупногабаритных гильзах из антифрикционных легированных чугунов. Авторами работы было выявлено ряд технологических особенностей, которые позволили создать предпосылки применения процесса комбинированного деформирующе-режуще-деформирующего протягивания для получения отверстий в крупных чугунных цилиндрах, которые имели следующие параметры точности и качества обработанной поверхности:

Нецилиндричность:

– некруглость – 0,015 мм;

– отклонение профиля в продольном сечении – 0,015 мм.

Непрямолинейность оси обработанного отверстия – 0,03 мм.

Неперпендикулярность оси внутреннего отверстия относительно торцов цилиндра – 0,1 мм.

Шероховатость обработанной поверхности $R_z = 3,2$ мкм.

Однако, для создания научных и технологических основ применения процесса комбинированного протягивания для обработки больших отверстий в гильзах двигателей тепловозов из антифрикционных, жаростойких марок чугунов необходимо провести комплекс исследований по определению влияния технологических параметров процесса комбинированного протягивания, схемы обработки, конструкции инструмента на условия контактного взаимодействия инструмента с деталью, точность, качество и физико-механические свойства обработанной поверхности.

Основными направлениями достижения поставленной цели являются:

- определение условий базирования и перемещения в системе «инструмент-деталь» в процессе протягивания с учетом параметров детали и технологического оборудования;
- изучение особенностей процесса стружкообразования при режущем протягивании деталей типа «гильза» из легированных чугунов;
- использование локального упрочнения обрабатываемого материала за счет реализации оптимальных путей деформирования для упрочнения поверхностного слоя обработанного изделия.

Перечисленные направления являются основой для разработки схемы процесса и инструмента для комбинированного протягивания крупногабаритных цилиндров из малопластичных материалов.

Для реализации поставленных задач был создан исследовательский компьютеризированный стенд на базе измерительной системы протоколирования данных УИС-10 МИКРОТЕХ® для изучения методом масштабного моделирования на заготовках меньших размеров деформационных процессов, которые протекают в зоне контакта рабочих элементов комбинированной протяжки с обрабатываемой поверхностью (рис.1). В состав стенда были включены также тензометрический динамометр оригинальной конструкции, который через специально разработанный аналогово-цифровой преобразователь подключался к компьютеру для регистрации сил протягивания. Таким образом, в процессе комбинированного протягивания на компьютер через USB порты поступала информация о смещении заготовки относительно базовых поверхностей в устройстве, деформации наружной поверхности заготовки в двух сечениях и осевой силе протягивания.

В процессе проведения экспериментов по моделированию комбинированного деформирующе- режуще- деформирующего протягивания были использованы чугунные гильзы тракторных двигателей, материал которых по химическому составу и механических свойствам близок к материалу гильз тепловоза А-ХНМГ и А-ХНМД. Поэтому, с достаточной степенью достоверности можно считать, что обрабатываемость используемых гильз резанием и деформированием будет адекватна обрабатываемости тепловозных гильз из вышеуказанных марок чугунов.

Длина заготовки – 246 мм, а внутренний диаметр -110 мм. Толщина стенки-6,75...7,5мм. Размеры заготовки для исследований показаны на рисунке 2.

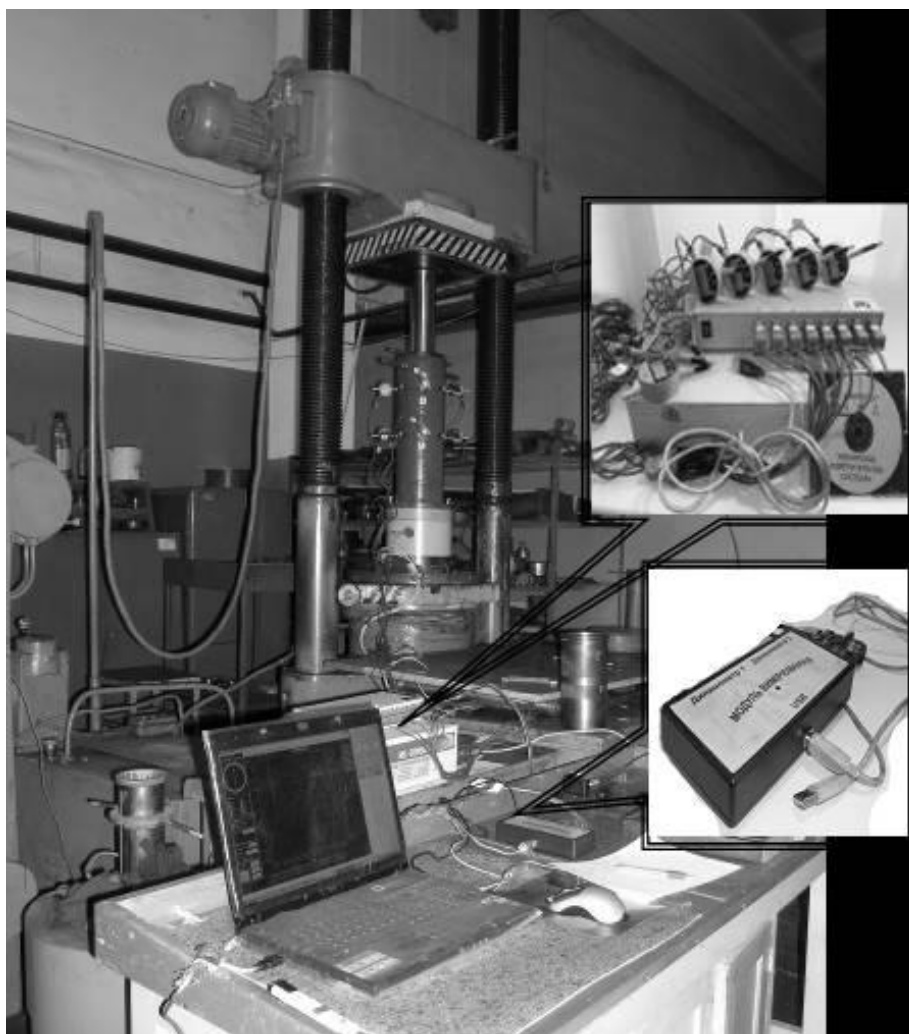


Рисунок 1 – Исследовательский стенд для изучения процесса комбинированного протягивания

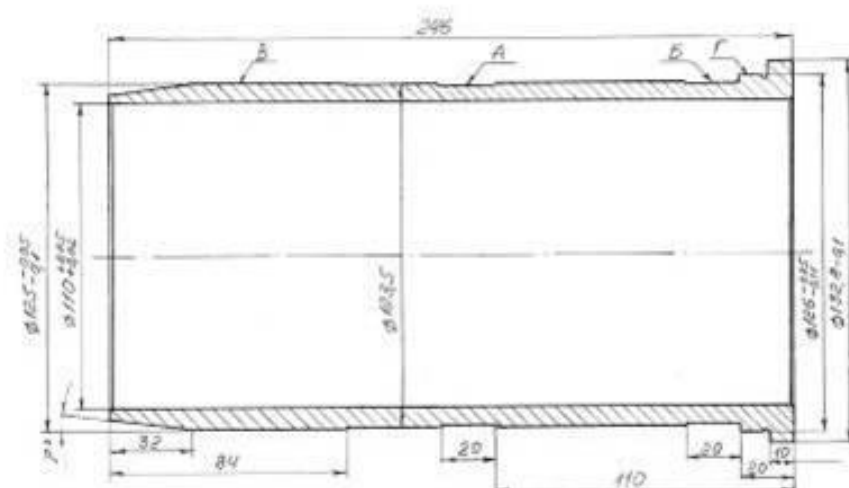


Рисунок 2 – Размеры гильзы для проведения экспериментальных исследований

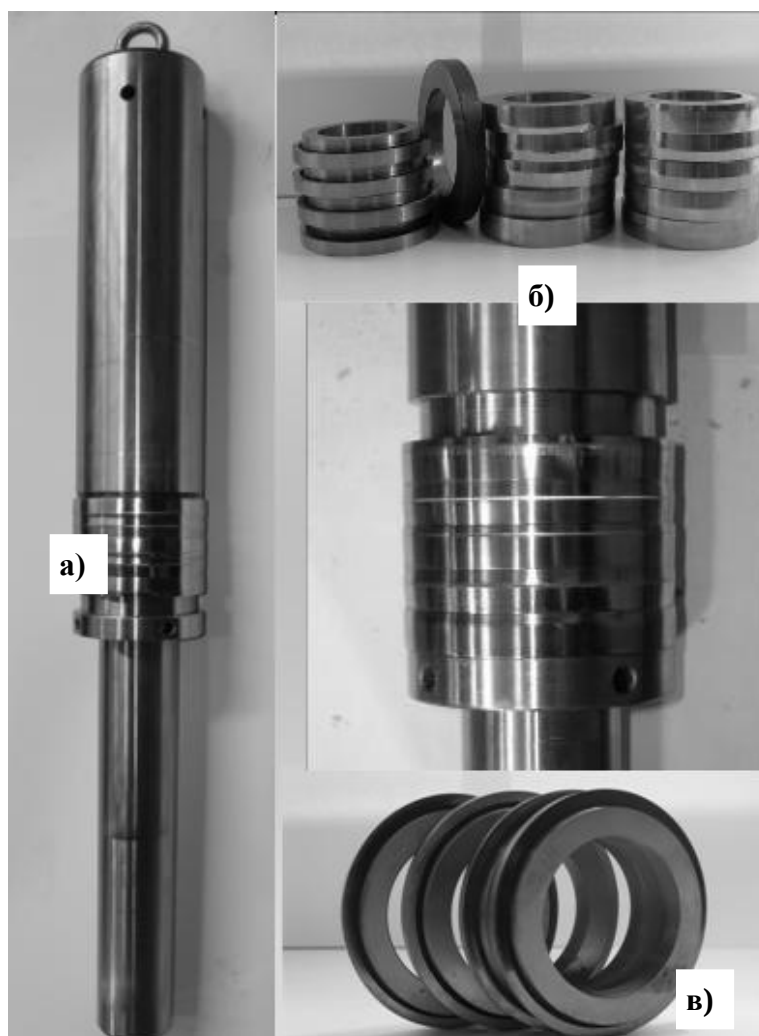
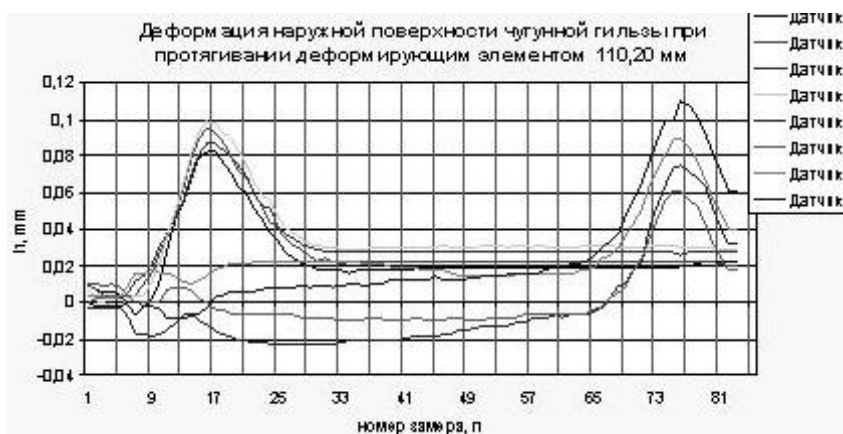


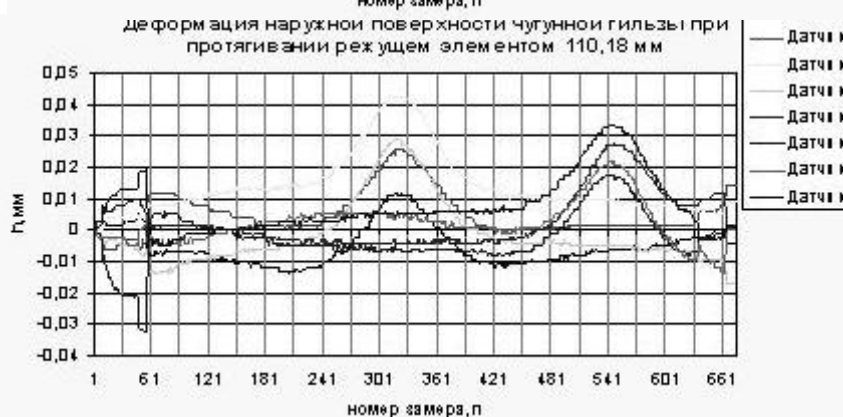
Рисунок 3 – Комбинированная протяжка а) и комплект деформирующих б) и режущих в) элементов.

На рисунке 3 представлен комбинированный протяжной инструмент и комплект режущих и деформирующих элементов, позволяющий осуществлять различные варианты комбинированного протягивания.

В результате экспериментального изучения деформационных процессов на внешней поверхности заготовки в процессе комбинированного протягивания впервые были установлены размеры волны упругопластической деформации (рис.4), которая выходит на внешнюю поверхность обрабатываемой детали и охватывает значительную по длине зону, как впереди, так и позади деформирующих и режущих элементов протяжки, а также установленные размеры упругой и пластической долей деформации обработанной поверхности. Полученные результаты позволяют оптимизировать взаимное расположение и геометрические параметры рабочих элементов протяжки с целью получения обработанной поверхности с заданными параметрами точности и качества.



а)



б)

Рисунок 4 – Графическое представление записи волны упруго пластической деформации образующейся на:

а) – деформирующем элементе; б) – режущем элементе протяжки.

Результаты микродюрOMETрических исследований поверхностного слоя обработанной поверхности в процессе деформирующего протягивания свидетельствуют о возможности упрочнения поверхностного слоя обработанного отверстия в гильзах из легированных чугунов на 22...28% при относительной деформации обрабатываемой поверхности в пределах 0,33...0,35% (рис.5). Определено, что количество циклов деформации, при которых относительное упрочнение поверхностного слоя обработанной поверхности имеет максимальные значения, равняется двум.

Установлено, что в процессе режущего протягивания антифрикционных, легированных чугунов образовывается стружка, которая состоит из элементов, размер которых не зависит от толщины срезаемого слоя, и составляет 0,2...0,25 мм в направлении резания вдоль оси заготовки. При увеличении толщины срезаемого слоя свыше 0,2 мм вид стружки изменяется из надлома на элементную. Это изменение сопровождается созданием веретенообразных валиков, размещение которых в канавке для стружки характеризуется низкой степенью уплотнения. Такую особенность процесса стружкообразования весьма

важно учитывать при проектировании полостей для сбора стружки в конструкции протяжного инструмента, который применяется при обработке больших отверстий, так как объем срезаемого материала может быть значительным и при превышении объема стружечных канавок может происходить заклинивание инструмента в гильзе.

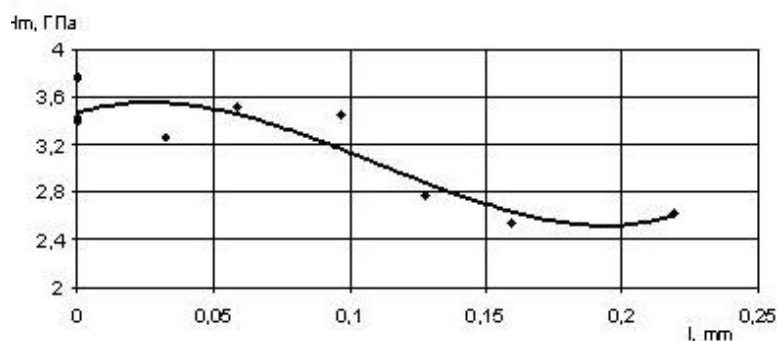


Рисунок 5 – Распределение микротвердости по глубине после деформирующего протягивания элементами $\varnothing 110,31$; $\varnothing 110,34$ мм угол 2° .

Экспериментально определено, что при относительной деформации в пределах $\varepsilon=0,18\ldots 0,28\%$ (рис.6) внутренней поверхности гильз из антифрикционных, легированных чугунов, обработанной деформирующим протягиванием, можно получить микрорельеф с плоскими вершинами (рис.7), который характеризуется карманами для смазки, расположенными в плоскостях перпендикулярных оси вращения гильзы. Формирование такого рельефа позволит сократить базовый технологический процесс на две операции: чистового (алмазного) растачивания и предварительного хонингования.

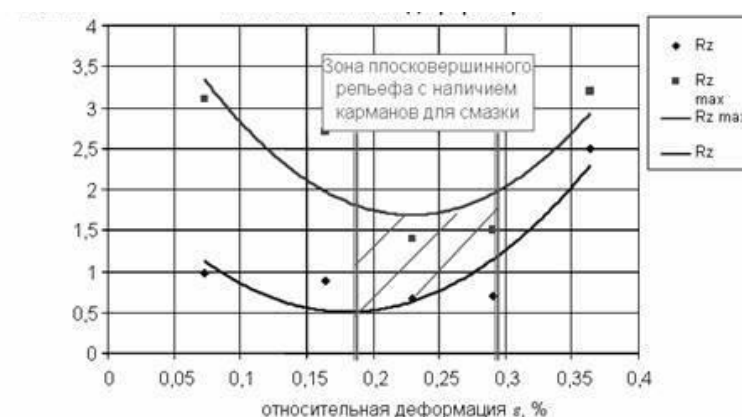


Рисунок 6 – Зависимость шероховатости протянутой поверхности от относительной деформации ε заготовки

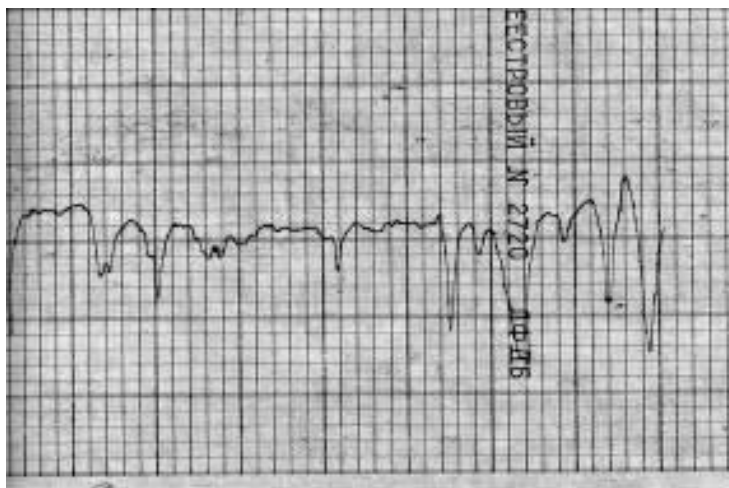


Рисунок 7 – Профилограмма обработанной деформирующим протягиванием поверхности гильзы из легированного чугуна при относительной деформации заготовки $\varepsilon=0,2\%$.

Установлено, что при деформирующем протягивании гильз из легированных чугунов существует максимальная усадка (уменьшение диаметра обработанного отверстия по сравнению с диаметром последнего деформирующего элемента), составляющая 89% от суммарного натяга при его значении $a=0,32$ мм.

Определен характер и параметры износа деформирующих элементов при комбинированном протягивании антифрикционных легированных чугунов. Установлено, что при угле рабочего конуса $\alpha=2^\circ$ величина износа минимальная.

Основываясь на представленных выше результатах выполненных исследований, были спроектированы деформирующе-режуще-деформирующая протяжка сборной конструкции и специальное технологическое приспособление для базирования обрабатываемой заготовки (гильза двигателя тепловоза с внутренним диаметром 260 мм) и точного перемещения инструмента относительно обрабатываемой поверхности для реализации процесса комбинированного протягивания на гидравлическом прессе аккумуляторного типа. Разработаны рекомендации по их использованию в процессе протягивания крупногабаритных гильз из антифрикционных легированных чугунов.

Список литературы: 1. Розенберг О.А., Студенец С.Ф., Мельниченко В.В. Особенности использования комбинированного протяжного инструмента для обработки внутренних полостей крупных чугунных цилиндров//Породоразрушающий и металло-обрабатывающий инструмент - техника и технология его изготовления и применения: Сб. науч. тр. - К.: Изд-во ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2008. – Вып. 11. - С. 428-433.

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ОБРОБКИ

УДК 004.942

А. А. БОНДАРЬ, Т. Н. ПАНОВА,

А. Л. СТАНОВСКИЙ д-р техн. наук, Одесса, Украина

МЕТОД ВИРТУАЛЬНОГО ОБЪЕКТА ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Запропоновано метод віртуального об'єкта при моделюванні життєвого циклу розрахований для визначення умови, що визначає траєкторію його руху. Наведено результати побудови такої "віртуальної" моделі об'єкта на прикладі системи "виливка - форма".

Предлагаемый метод виртуального объекта при моделировании жизненного цикла рассчитан для определения условия, определяющего траекторию его движения. Приведены результаты построения такой "виртуальной" модели объекта на примере системы «отливка - форма».

The method of dynamic object modelling at which life cycle leaves for time frameworks of a definition parametre range of the condition defining trajectory of its movement is offered. The construction of such «virtual» object model on a system «casting – form» example is resulted.

Вопросы самосинхронизации подсистем объектов проектирования и управления представляют значительный интерес при создании и эксплуатации нестабильных технических систем [1]. В этих условиях актуальной представляется проблема моделирования жизненного цикла таких объектов, в особенности, при создании моделей таких динамических систем, у которых жизненный цикл выходит за временные рамки области определения параметра состояния, определяющего траекторию его движения.

Для самосинхронизации, прежде всего, необходимо, чтобы объект представлял собой динамическую систему, порожденную дифференциальными

$$\frac{dy}{d\tau} = f(y); y \in \mathbf{R}^n \quad (1)$$

или разностными уравнениями:

$$y(t+1) = f(y(t)), t \in \mathbf{Z}, y \in \mathbf{R}^n \quad (2)$$

где τ – непрерывное время; t – дискретное время; y – множество учитываемых параметров объекта; $\mathbf{R}^n$ – размерность пространства учитываемых состояний, в котором движется объект, $\mathbf{Z}$ – множество целых чисел [2].

Условие 1. Уравнения (1) или (2) порождают динамическую систему, если по любому начальному состоянию $y_0 \in \mathbf{R}^n$ однозначно определяется траектория $y(\tau, y_0)$ при $\tau \in [0, +\infty)$, где $y(\tau, y_0) = y_0$.

Рассмотрим в качестве примера такого динамического объекта систему «отливка – песчаная литейная форма». Выбор этого объекта обоснован тем, что:

- он естественно распределяется, по меньшей мере, на две подсистемы: отливка и форма;
- между подсистемами существует весьма тесная связь – все сдвиги и события, которые происходят в одной подсистеме, немедленно отражаются на другой;
- существует явным образом выраженная цель синхронизации событий в подсистемах – качество отливок.

Рассмотрим систему «отливка – форма» как динамическую, то есть такую, в которой по любому начальному состоянию $y_0 \in \mathbf{R}^n$ в соответствии с Условием 1 дальнейшая траектория ее движения $y(\tau, y_0)$ в n -мерном фазовом пространстве y определена однозначно [2].

Пусть в нашем примере в каждой из подсистем $n = 1$, т.е. фазовое пространство обеих подсистем одномерно, а именно: подсистема «отливка» характеризуется ее температурой T , а подсистема «песчаная форма» – давлением газов в ее рабочем слое P .

Пусть специалистами в предметной области (в данном случае – в литейном производстве) установлено что при литье в песчано-смоляные формы одновременное (с некоторым допуском ε) и безотносительное к конкретному значению времени достижение температурой отливки значения $T = 1743$ К и давлением газов в порах песчаной формы значения $P = 215$ Па обеспечивает получение стальных отливок с качественной поверхностью [3].

Тогда у системы «отливка – форма» $n = 2$, а вектор фазового состояния $y(\tau, y_0)$ состоит из двух компонентов: $T(\tau, T_0)$ и $P(\tau, P_0)$. Задаваясь начальными значениями: $\tau_0 = 0$ (момент окончания заливки), $T_0 = 1823$ К (температура заливки) и $P_0 = 0$ Па (давление окружающей среды), получим на интервале $0 \leq \tau \leq 35$ с траекторию движения $y(\tau, y_0)$ в виде двух кривых (рис. 1, а, б).

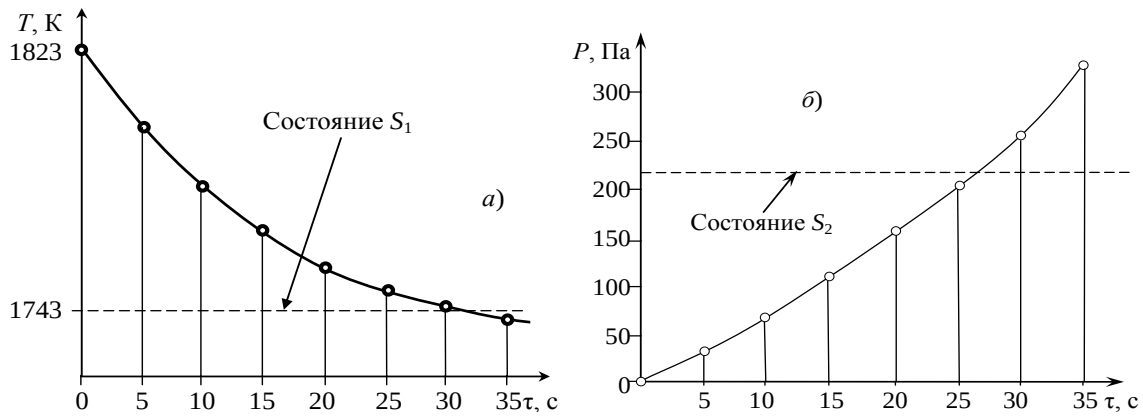


Рисунок 1 – Движение системы «отливка – форма» в фазовом пространстве:
 а – температура отливки T ; б – давление в порах песчаной формы P .

Динамическая система, которая самопроизвольно движется во времени и пространстве своих состояний, может подвергаться действию аттракторов, «притягивающих» систему к некоторому конечному относительно стабильному состоянию. Как известно, аттрактор динамической системы – замкнутое, инвариантное множество в ее фазовом пространстве [4].

Условие 2. Множество K является локальным аттрактором динамической системы (1) или (2), если выполняется соотношение:

$$\lim_{\tau \rightarrow \infty} \rho[K, \mathbf{y}(\tau, \mathbf{y}_0)] = 0, \quad \forall \mathbf{y}_0 \in K(\varepsilon), \quad (3)$$

где K – множество точек $\mathbf{x}$, для которых $\rho[K, \mathbf{y}] < \varepsilon$; $\rho[K, \mathbf{y}] = \inf_{z \in K} |\mathbf{z} - \mathbf{y}|$; $|| \cdot ||$ – евклидова норма в $\mathbf{R}^n$, $K(\varepsilon)$ – множество точек $\mathbf{y}$, для которых $\rho[K, \mathbf{y}] < \varepsilon$.

Так как в случае самосинхронизации аттрактор представляет собой некоторую зону шириной ε вдоль линии $\mathbf{y} = 0$, примем $K = 0$, и (3) преобразуется к виду:

$$\lim_{\tau \rightarrow \infty} (\mathbf{y}(\tau, \mathbf{y}_0)) = 0, \quad \forall \mathbf{y}_0 \in K(\varepsilon). \quad (4)$$

Найдем теперь вид зависимости $\mathbf{y}(\tau, \mathbf{y}_0)$. Пусть некоторый динамический объект состоит из двух подсистем состояние которых описывается зависимостями:

$$y_1 = f_1(\tau, y_2, y_{10}); \quad y_2 = f_2(\tau, y_1, y_{20}). \quad (5)$$

Подставляя в (5) $y_1 = S_1$; $y_2 = S_2$, получим систему

$$S_1 = f_1(\tau, y_2(\tau), y_{10}); \quad S_2 = f_2(\tau, y_1(\tau), y_{20}). \quad (6)$$

решая которую относительно времени самосинхронизации, получим:

$$\tau_{s1} = \tilde{f}_1(S_1; y_2(\tau); y_{10}); \quad \tau_{s2} = \tilde{f}_2(S_2; y_1(\tau); y_{20}). \quad (7)$$

В выражениях (7) $\tau_{s1}, \tau_{s2}, S_1, S_2, y_{10}, y_{20}$ – суть числа. Поэтому их можно записать так:

$$\tau_{s1} = \tilde{f}_1(y_2(\tau)); \quad \tau_{s2} = \tilde{f}_2(y_1(\tau)). \quad (8)$$

Теперь можно сформулировать цель самосинхронизации:

$$|\tau_{s1} - \tau_{s2}| = |\tilde{f}_1(y_2(\tau)) - \tilde{f}_2(y_1(\tau))| \leq \varepsilon. \quad (9)$$

Поскольку мы хотим, чтобы условия самосинхронизации были для литейного объекта аттрактором, примем:

$$y(\tau, y_0) = |\tilde{f}_1(y_2(\tau)) - \tilde{f}_2(y_1(\tau))|. \quad (10)$$

Соответственно, (8) приобретет конечный вид:

$$\lim_{\tau \rightarrow \infty} |\tilde{f}_1(y_2(\tau)) - \tilde{f}_2(y_1(\tau))| = 0, \quad \forall y_0 \in K(\varepsilon). \quad (11)$$

Выражение (11) является ключевым, поскольку выполнение этого условия – суть необходимое и достаточное условия самосинхронизации событий. Отметим также, что условие (11) есть прогнозно-расчетным, то есть речь идет уже не о движении динамической системы в течение времени в пространстве множества (в нашем примере – двухмерного) своих параметров, а о *движении расчетного (виртуального) времени синхронизации в пространстве множества фактических (реально измеренных) параметров динамической системы.*

Схема жизненного цикла объекта проектирования представлена на рис. 2. На схеме на осях отложено время τ и параметр десинхронизации Δ , имеющий двоякое значение:

– если настоящее время $\tau_{\text{наст}}$ (на рис. 1, а $\tau_{\text{наст}} = 0$) меньше большего из значений τ_p^* и τ_T^* (рис. 1, а), то Δ – суть прогнозное значение модуля $|\tau_p^* - \tau_T^*|$, полученное, например, расчетом по моделям подпроцессов;

– если настоящее время $\tau_{\text{наст}}$ (на рис. 1, б $\tau_{\text{наст}} = \tau_3$) больше большего из значений τ_p^* и τ_T^* (рис. 1, б), то Δ – суть фактическое значение модуля $|\tau_p^* - \tau_T^*|$, полученное, например, измерением.

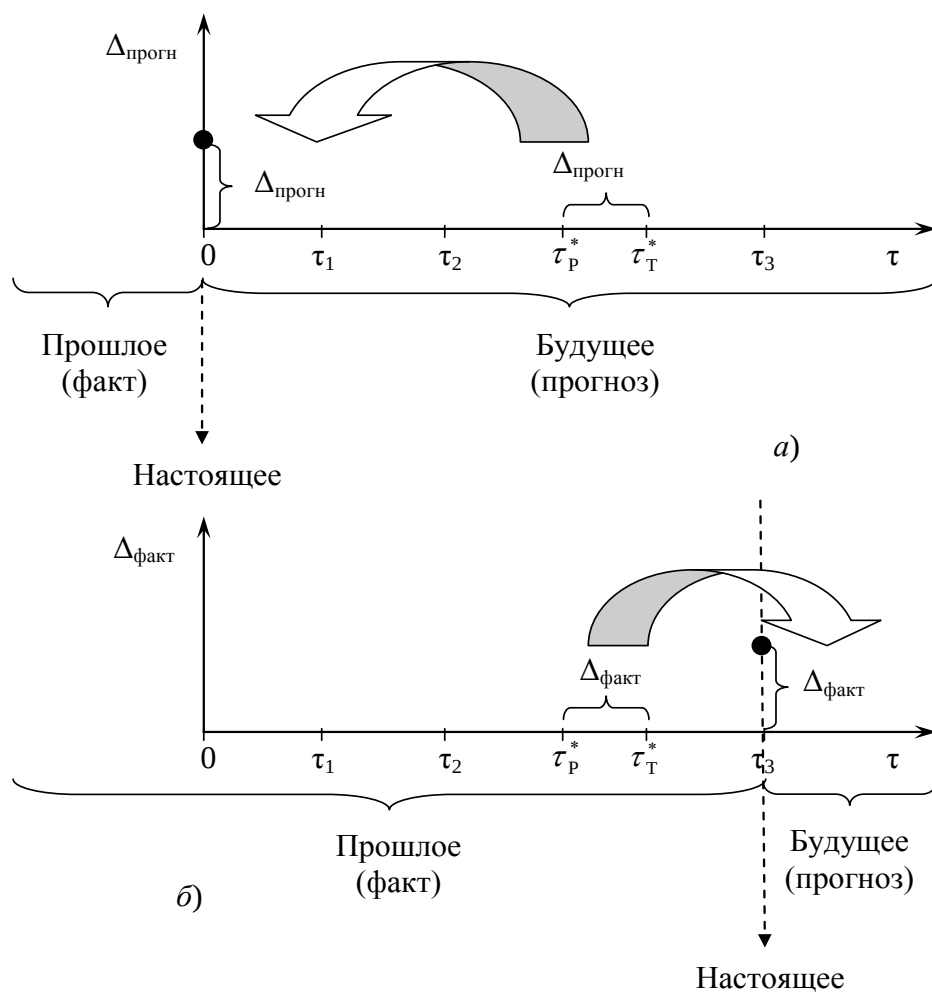


Рисунок 2 – Схема к описанию жизненного цикла объекта проектирования:

а – прогноз на период $\tau \rightarrow \tau_T^*$; б – факт на период $\tau_T^* \rightarrow \tau$

Движение объекта проектирования в одномерном пространстве состояний, где единственным измерением является функционал (10) в левой (по графику) части своего жизненного цикла является виртуальным, т.к. функционал не существует на этом интервале (события еще не произошли!). Его отображением является дискретный ряд точек, полученных расчетом для каждого конкретного промежуточного состояния объекта в «реальных» координатах (рис. 3).

Поскольку при проектировании целью расчета является выполнение условия $|\tau_P^* - \tau_T^*| = 0$, начало виртуального состояния объекта всегда совпадает с началом координат (точка 1, рис. 3).

Заметим, что точка $(0, 0)$ в процессе проектирования является заданием на проектирование, т.к. при этом реализуются методы решения *обратной* задачи: от следствия (задания) к причинам: свойствам объекта как динамической системы (1) или (2).

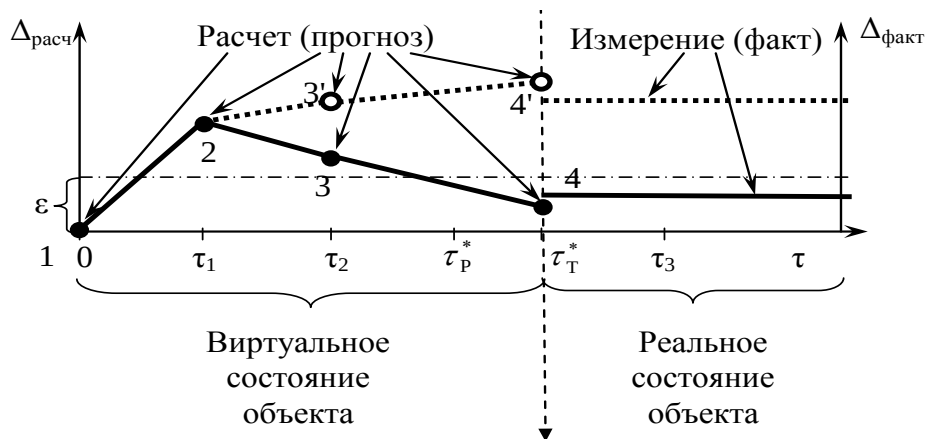


Рисунок 3 – График жизненного цикла объекта проектирования

Если в некоторый момент времени τ_1 измерить реальное состояние объекта, то расчет $|\tau_P^* - \tau_T^*|$ может быть выполнен для этого состояния как для начального.

Это будет уже *прямой* расчет, который с точностью, определяемой точностью расчетной модели, покажет, на сколько прогнозное значение $|\tau_P^* - \tau_T^*|$ отклонится в этом случае от нуля (точка 2, рис. 3).

В дальнейшем, отклонения неучтенных расчетом параметров могут привести к увеличению прогнозного значения $|\tau_P^* - \tau_T^*|$, которое может выйти за границы допустимого коридора шириной ε (точки 3' и 4', рис. 6), либо, наоборот, к его уменьшению, вплоть до возвращения к выполнению неравенства $|\tau_P^* - \tau_T^*| < \varepsilon$ (точки 3 и 4, рис. 3).

Условное соединение этих расчетных точек с помощью сплошных или пунктирных линий позволяет обозначить некоторый условный «путь» виртуальной (прогнозной) части жизненного цикла рассматриваемого объекта, когда параметр, по которому он оценивается ($|\tau_P^* - \tau_T^*|$), еще не существует.

Так как прошлое (фактическое, измеренное) значение $|\tau_P^* - \tau_T^*|$ неизменно на интервале $\tau_T^* \rightarrow \infty$, (оба события уже произошли), соответствующая этому интервалу часть графика, отражающего реальный жизненный цикл исходного объекта, представляет собой реальную горизонтальную прямую линию на рис. 3.

При этом сдвиг на границе между виртуальным и реальным состояниями объекта определяется погрешностью расчета на последнем виртуальном этапе.

Таким образом, все точки ломаной кривой на рис. 3 могут быть получены расчетом из начального состояния объекта. Это означает, что выполняются дискретное динамическое уравнение (2) и Условие 1, а значит система (5) может считаться математической моделью виртуального динамического объекта.

На основании сказанного можно построить уравнение ломаной на рис. 3, которое будет иметь следующий вид:

$$\Delta\tau = \begin{cases} \Delta\tau_{\text{прогноз}} = f_{\text{дискр}}(\mathbf{V}, \mathbf{Q}) \Big|_{0 \leq \tau \leq \tau_T^*}; \\ \Delta\tau_{\text{факт}} = \left| \tau_T^* - \tau_P^* \right| \Big|_{\tau_T^* \leq \tau \leq \infty}. \end{cases} \quad (12)$$

где $f_{\text{дискр}}(\mathbf{V}, \mathbf{Q})$ – дискретная функция, выражающая зависимость значения десинхронизации реальных событий в подсистемах объекта от вектора его внутренних параметров $\mathbf{V}$ и вектора свойств окружающей объект среды $\mathbf{Q}$. Примером множества компонент вектора $\mathbf{V}$ может служить множество свойств материалов отливки и формы (химический состав, пористость, плотность, теплоемкость, теплопроводность и пр.), а вектора $\mathbf{Q}$ – внешних по отношению к форме переменных процесса (скорость и температура заливки металла, температура окружающей среды, расход охлаждающего воздуха и пр.).

В определенных пределах компоненты векторов $\mathbf{V}$ и $\mathbf{Q}$ доступны для выбора проектирующей системой. Последнее дает возможность положить выражение (12) в основу технологических расчетов в САПР-Т литейного производства.

Список литературы: 1. Бондарь А.А. Методы самосинхронизации динамических процессов в САПР литейного производства / А.А. Бондарь, Г.В. Кострова, Т.В. Лысенко // Труды Одес. нац. политехн. ун-та. – 2009. – Вып. 2(32). – С. 7 – 10. 2. Леонов Г.А. Странные аттракторы и классическая теория устойчивости движения // Успехи механики. – 2002. – № 3. – С. 3 – 43. 3. Лысенко Т.В. Управление процессами в литейной форме / Т.В. Лысенко, В.П. Малахов, А.Л. Становский. – Одесса: ВМВ, 2009. – 475 с. 4. Фрадков А.Л. Кибернетическая физика: принципы и примеры. – СПб: Наука, 2003. – 208 с.

А.И. ГРАБЧЕНКО, д-р техн. наук,
В.Л. ДОБРОСКОК, д-р техн. наук,
Я.Н. ГАРАЩЕНКО, канд. техн. наук, Харьков, Украина,
А.Н. ШПИЛЬКА, Полтава, Украина

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ВЕРОЯТНОСТНАЯ МОДЕЛЬ РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ АБРАЗИВНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ

Розглянуто питання моделювання робочої поверхні абразивних інструментів на базі статистичної параметризації законів розподілу розмірів зерен. Статистична параметризація забезпечується модифікацією параметрів масштабовуваних законів розподілу, із приведенням їх до трьох: характеристичного розміру абразивних зерен, коефіцієнту зсуву математичного очікування щодо характеристичного розміру й коефіцієнту варіації. Отримано розрахункові залежності для визначення характеристик розподілу зерен на робочій поверхні абразивних інструментів.

Рассмотрены вопросы моделирования рабочей поверхности абразивных инструментов на базе статистической параметризации законов распределения размеров зерен. Статистическая параметризация обеспечивается модификацией параметров масштабируемых законов распределения с приведением их к трем: характеристическому размеру абразивных зерен, коэффициенту смещения математического ожидания относительно характеристического размера и коэффициенту вариации. Получены расчетные зависимости для определения характеристик распределения зерен на рабочей поверхности абразивных инструментов.

Questions of modelling of a working surface of abrasive tools on the basis of statistical parametrization of distribution laws of grains sizes are considered. Statistical parametrization is provided with modification of parameters of scaled laws of distribution with their reduction three: to a characteristic size of abrasive grains, factor of displacement of a expectancy concerning the characteristic size and to coefficient of variation. Functional relations for definition of characteristics of distribution of grains on a working surface of abrasive tools are received.

Современный абразивный инструмент обладает широким спектром технологических возможностей по видам, типам, размерам, характеристикам и соответственно своим режущим свойствам. Его многообразие адекватно отображает необходимость выполнения технологических требований различных процессов абразивной обработки

по скорости резания, производительности, термодинамическим нагрузкам, точности и качеству обработанных деталей.

Моделирование абразивно-алмазных инструментов является определяющим этапом при разработке теоретических основ процесса шлифования. Теоретические работы в этой области, как правило, направлены на создание модельных представлений о шлифовальном круге как объекте и получение на их основе аналитических зависимостей, связывающих исходные параметры с характеристиками расположения элементов зерен на его рабочей поверхности [1, 2, 3, 7] и др.

Сложность получения реалистической модели рабочей поверхности абразивного инструмента связана со стохастической природой исходного объекта. Среди всех режущих инструментов абразивные являются единственными, у которых регламентируются не геометрические параметры режущих элементов, а зерновой состав исходной навески зерен. Это затрудняет исследование рельефа инструмента, требует применения методов теории вероятности и математической статистики при моделировании и описании результатов экспериментальных исследований.

Можно выделить четыре основных элемента на базе которых строятся статические модели рабочей поверхности абразивно-алмазного инструмента: форма и закон распределения размеров зерен, закон распределения центров зерен в абразивном пространстве, пространство абразивного слоя и поверхность связи определенным образом расположенная в абразивном пространстве, распределение вершин зерен относительно поверхности связи.

При теоретических расчетах и моделировании сложная геометрическая форма реальных алмазных и абразивных зерен исследователями в зависимости от решаемой задачи заменяется упрощенным эквивалентом на базе трехосного эллипсоида: шаром [2, 7] или эллипсоидом вращения с постоянным соотношением осей [1, 9]. Проведенные специальные исследования по анализу метрической формы плоского сечения зерен из сверхтвердых материалов [6] показали, что сечением, наиболее близким к реальной форме зерна, является эллипс. Эти данные хорошо согласуются с работами по определению коэффициента заполнения пространственной формы зерен в виде эллипсоида вращения.

Использование модели в виде трехосного эллипсоида еще более точно соответствует эквивалентной форме зерен. Вероятностный закон распределения размеров зерен по каждой из осей задается одномерным, непрерывным, одинаковым и независимым. Тогда каждое отдельное зерно

будет представлять собой трехосный эллипсоид с различным соотношением осей. Для достаточно большой выборки таких зерен их средняя форма будет асимптотически приближаться к шару с диаметром равным математическому ожиданию закона распределения размеров.

Целью работы является построение параметрической вероятностной модели для определения характеристик распределения зерен на рабочей поверхности абразивных инструментов.

Абразивные зерна и порошки из синтетических алмазов и других сверхтвердых материалов представляют собой совокупность зерен различной величины и формы: монокристаллы, осколки, сrostки и поликристаллы. При производстве и контроле порошок подразделяют на фракции.

Основной фракцией называется совокупность зерен определенного размера, преобладающих в составе данного порошка по массе в шлифпорошках и по числу зерен в микропорошках. Получить абразивный порошок, состоящий только из зерен одного размера, не представляется возможным, поэтому, кроме основной фракции, в составе порошков содержатся побочные фракции, которые крупнее или мельче основной.

Для описания всего разнообразия диапазонов с учетом вероятностной природы размеров зерен необходимо выполнить их статистическую параметризацию [3].

Статистическая параметризация обеспечивается модификацией параметров масштабируемых законов распределения с приведением их к трем: характеристическому размеру абразивных зерен a_0 (масштабный коэффициент, мкм), коэффициенту смещения математического ожидания относительно характеристического размера k_m (коэффициент относительного расположения) и коэффициенту вариации k_v (коэффициент формы).

Характеристический размер a_0 - максимальный размер зерен основной фракции в мкм, тогда в зависимости от обозначения зернистости и типов абразивных порошков его значения определяются следующим образом:

- абразивное шлифзерно и шлифпорошки (ГОСТ 3647-80) $\Rightarrow a_0 = 12,6 Z$, где Z - номер зернистости ($Z = 200 \dots 4$);
- абразивные микропорошки (ГОСТ 3647-80) $\Rightarrow a_0$ - соответствует числу после буквы М (М63...М5);
- порошки и микропорошки из синтетического алмаза и КНБ (ДСТУ 3292-95, ранее был ГОСТ 9206-80) $\Rightarrow a_0$ - соответствует первому числу (числителю дроби).

Коэффициент относительного расположения k_m - отношение математического ожидания $E(d_{mean})$ закона распределения размеров зерен к характеристическому размеру: $k_m = E / a_0$ ($d_{mean} = a_0 k_m$).

Коэффициент вариации k_v - отношение среднеквадратического отклонения s закона распределения размеров зерен к математическому ожиданию: $k_v = s / E$ ($s = d_{mean} k_v = a_0 k_m k_v$).

Интервал возможных значений размеров зерен соответствует $0 < d < d_{max}$. В общем случае максимально возможный размер зерен определяется по зависимости (значения коэффициентов приведены в табл. 1):

$$d_{max} = a_0 k_{max} = a_0 k_{lim} k_{form}, \quad (1)$$

где k_{lim} - коэффициент предельной фракции, зависящий от знаменателя геометрической прогрессии интервала размеров фракций; k_{form} - коэффициент формы зерен характеризует их возможность проходить через ячейки предельного сита наименьшим сечением $k_{form} = 1 \dots 1.3$ (для ориентировочных расчетов $k_{form} \approx 1,15$), для микропорошков контролируемых микроскопическим методом $k_{form} = 1$.

Таблица 1 – Значения коэффициентов, определяющих $d_{max} = a_0 k_{max}$

Наименование	k_{lim}	k_{form}	k_{max}
Абразивное шлифзерно и шлифпорошки	$\varphi = 1,26$	1,15	1,45
Шлифпорошки из СТМ узкого диапазона зернистости	$\varphi^2 = 1,59$	1,15	1,83
Шлифпорошки из СТМ широкого диапазона зернист.	$\varphi^4 = 2,54$	1,15	2,92
Микропорошки из СТМ узкого диапазона зернист.	$\varphi^2 = 1,59$	1	1,59

Распределение размеров абразивных зерен

Рассмотрим основные свойства нормального закона распределения и (производного от него) логарифмически-нормального, наиболее часто используемых при описании распределения параметров рабочей поверхности абразивного инструмента и исходных характеристик шлифпорошков [1, 8].

Плотность вероятности распределения размеров зерен $d \equiv x$ по нормальному закону имеет вид:

$$f_N(x; \mu_N, \sigma_N) = \frac{1}{\sigma_N \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \mu_N}{\sigma_N} \right)^2 \right], \quad 0 < x < d_{\max}, \quad (2)$$

где μ_N, σ_N - параметры закона распределения, зависящие от характеристик порошка ($\mu_N = a_0 k_m, \sigma_N = a_0 k_m k_v$) и соответствующие математическому ожиданию $E(d_{mean})$ и среднеквадратическому отклонению s ; $d_{\max} = a_0 k_{\max}$.

Случайная величина x называется логарифмически-нормально распределенной, если ее логарифм ($\ln x$) подчинен нормальному закону распределения. Плотность вероятности для логарифмически-нормального распределения размеров зерен $d \equiv x$:

$$f_{LN}(x; \mu_{LN}, \sigma_{LN}) = \frac{1}{x \sigma_{LN} \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln x - \mu_{LN}}{\sigma_{LN}} \right)^2 \right], \quad 0 < x < d_{\max}, \quad (3)$$

где μ_{LN}, σ_{LN} - параметры закона распределения, зависящие от характеристик порошка и определяемые по зависимостям [4]:

$$\mu_{LN} = \ln \left(\frac{a_0 k_m}{\sqrt{k_v^2 + 1}} \right); \quad \sigma_{LN} = \sqrt{\ln(k_v^2 + 1)}. \quad (4)$$

Переход к характеристическим параметрам (a_0, k_m, k_v) для логарифмически-нормального закона распределения производится решением системы нелинейных уравнений относительно параметров μ_{LN}, σ_{LN} :

$$\begin{cases} a_0 k_m &= \exp(\mu_{LN} + \sigma_{LN}^2/2); \\ (a_0 k_m k_v)^2 &= \exp(2\mu_{LN} + \sigma_{LN}^2) [\exp(\sigma_{LN}^2) - 1], \end{cases} \quad (5)$$

где $a_0 k_m = E$ - математическое ожидание; $(a_0 k_m k_v)^2 = s^2 = D$ - дисперсия.

Таким образом, функции плотности вероятности нормального (2) и логарифмически-нормального (3) распределений зависят от характеристических (модифицированных) представительных параметров (a_0, k_m, k_v) . Значения параметров для практических расчетов [1, 3, 4] приведены в табл. 2 (примеры графиков плотностей распределения размеров представлены на рис. 1).

Таблица 2 – Значения параметров законов распределения размеров зерен

Наименование	Закон распределения размеров зерен			
	нормальный		лог-нормальный	
	k_m	k_v	k_m	k_v
Абразивное шлифзерно и шлифпорошки с индексом П	0,85÷0,88	0,22÷0,23	0,85÷0,87	0,19÷0,20
Абразивное шлифзерно и шлифпорошки с индексом Н	0,79÷0,83	0,25÷0,29	0,81÷0,85	0,20÷0,22
Абразивное шлифзерно с индексом Д	0,81÷0,82	0,34÷0,36	0,84÷0,85	0,27÷0,28
Шлифпорошки из СТМ узкого диапазона зернистости.	0,91÷0,93	0,11÷0,19	0,92÷0,94	0,11÷0,19
Шлифпорошки из СТМ широкого диапазона зернистости	0,79÷0,83	0,29÷0,35	0,78÷0,82	0,28÷0,30
Микropорошки из СТМ узкого диапазона зернистости	0,40÷0,73	0,26÷0,97	0,52÷0,73	0,23÷0,52
Микropорошки из СТМ широкого диапазона зернистости	0,30÷0,65	0,32÷1,46	0,44÷0,58	0,35÷0,58

Для примера рассмотрим нормальный закон распределения размеров зерен с параметрами, имеющими совпадающие значения по табл. 2 (абразивное шлифзерно и шлифпорошки с индексом Н и шлифпорошки из СТМ широкого диапазона зернистости): коэффициент относительного расположения математического ожидания $k_m = 0,82$; коэффициент вариации $k_v = 0,27$. Характеристический размер зерен примем $a_0 = 200$ мкм, что одновременно соответствует зернистости: $Z = a_0 / 12,6 = 15,9 \approx 16$ (абразивное шлифзерно и шлифпорошки) и 200/125 (шлифпорошки из СТМ широкого диапазона зернистости). Тогда средний размер зерен $d_{mean} = a_0 k_m = 200 \cdot 0,82 = 164$ мкм.

Количество зерен в единице объема абразивного инструмента

Рассмотрим исходный абразивный слой (абразивное пространство X-Y-Z), который для простоты дальнейших рассуждений представим как куб со сторонами A , мкм. Центры зерен равновероятно (по закону равной вероятности) распределены в пространстве абразивного слоя. Математическое ожидание (средний размер) зерен имеющих форму шара равно $d_{mean} = a_0 k_m$. Зерна занимают только часть объема куба: $V_3 = A^3 K_v$,

где $K_v < 1$ - коэффициент относительного объема занимаемого зернами. Тогда количество зерен Z_v в выделенном объеме A^3 будет равно отношению их объема V_3 к объему $\pi (d_{mean})^3 / 6$ среднего единичного зерна (A, d_{mean}, a_0 – величины одной размерности):

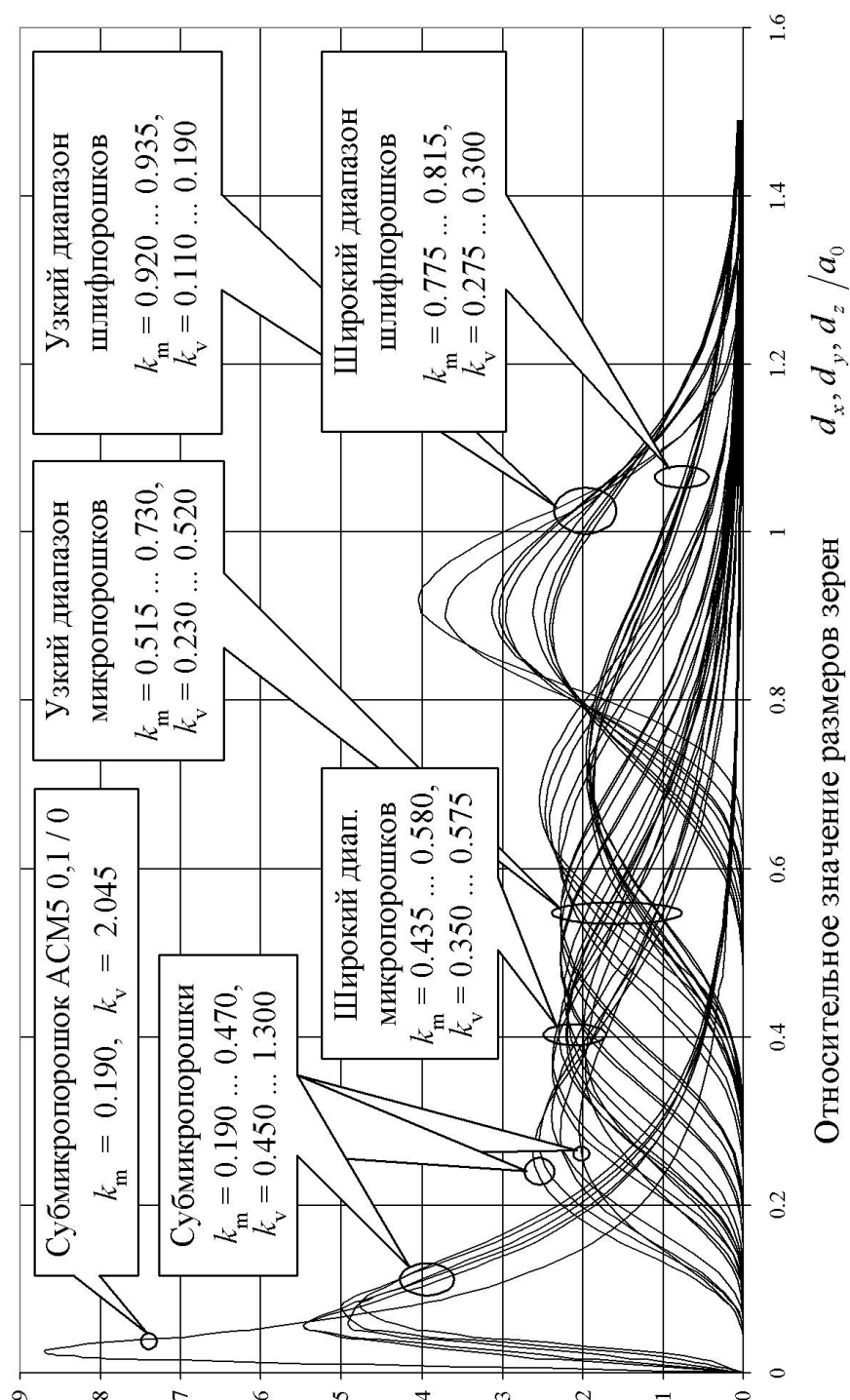


Рисунок 1 – Плотности логарифмически-нормального распределения размеров зерен в форме трехосного эллипсоида для алмазно-абразивных шлифпорошков, микропорошков и субмикропорошков по ДСТУ 3292-95

$$Z_v = \frac{6}{\pi} \left(\frac{A}{d_{mean}} \right)^3 K_v = \frac{6}{\pi} \left(\frac{A}{a_0 k_m} \right)^3 K_v. \quad (6)$$

Коэффициент относительного объема определяется по зависимостям:

- для инструментов из абразивных материалов

$$K_v = (31 - N) / 50; \quad (7)$$

- для инструментов из синтетического алмаза и КНБ

$$K_v = K / 400, \quad (8)$$

где N - номер структуры (условный); K - концентрация (условная) сверхтвёрдого материала в абразивном слое, %.

Взаимосвязь между относительной объемной концентрацией зерен в абразивном слое K_v и характеристиками абразивных (N) и абразивно-алмазных инструментов (K) приведена на рис. 2. Для алмазного инструмента $K_v = 0,0625 \dots 0,5$ ($K = 25 \dots 200\%$), а для абразивного $K_v = 0,38 \dots 0,6$ ($N = 12 \dots 1$), т. е. алмазный инструмент имеет, как правило, существенно меньшую объемную концентрацию.

Для примеров выберем совпадающее значение $K_v = 0,5$ ($N = 6$, $K = 200\%$).

Пример: $Z_v = 216,5$ шт/мм³ ($A = 1000$ мкм; $d_{mean} = 164$ мкм).

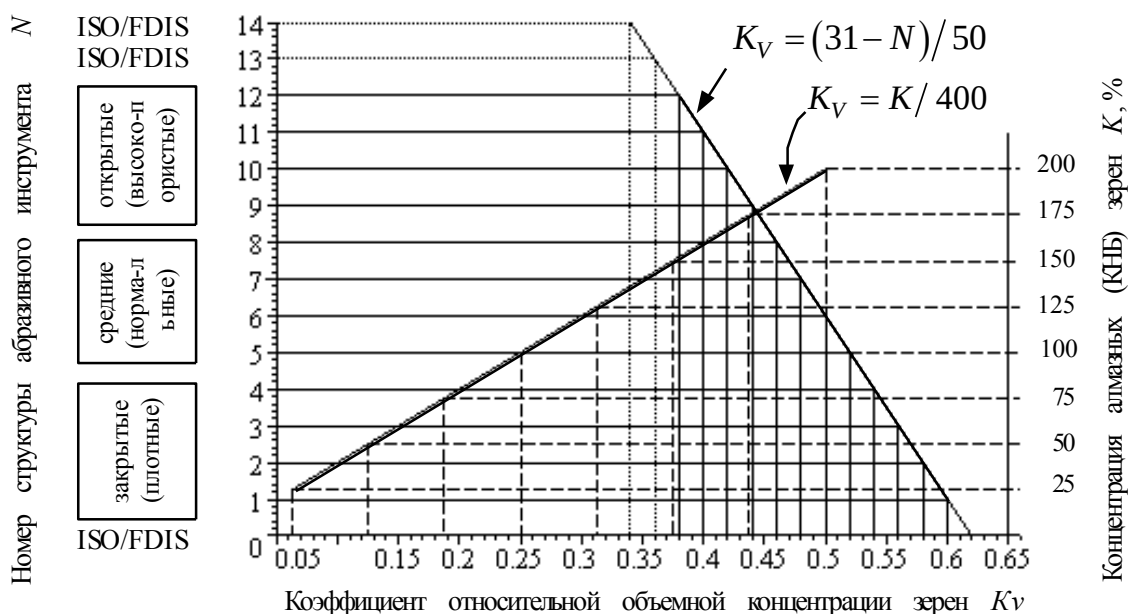


Рисунок 2 – Взаимосвязь между относительной объемной концентрацией зерен K_v и характеристиками абразивных и абразивно-алмазных инструментов

Количество зерен на единице площади рабочей поверхности абразивного инструмента

Рабочую поверхность абразивного инструмента можно представить как полупространство абразивного слоя ограниченное поверхностью связки. В общем случае поверхность связки может иметь произвольную форму. Для простоты рассуждений примем плоскость, что не отразится на конечном результате.

Выполним сечение исходного абразивного пространства A плоскостью $X-Y$ (условная поверхность связки). В сечение попадут зерна центры, которых находятся от него на расстоянии меньшем половины их диаметра d_{mean} . Тогда количество зерен Z_{S0} попавших в сечение $X-Y$ будет в A/d_{mean} меньше Z_v :

$$Z_{S0} = \frac{6}{\pi} \left(\frac{A}{d_{mean}} \right)^2 K_v = \frac{6}{\pi} \left(\frac{A}{a_0 k_m} \right)^2 K_v. \quad (9)$$

Разделим абразивное пространство A по сечению $X-Y$, удалив одну его часть, и получим полупространство рабочей поверхности инструмента. При этом не все зерна пересекаемые поверхностью связки останутся зафиксированными на рабочей поверхности, часть их (слабо закрепленных) вывалится. Для учета оставшихся зерен введем коэффициент относительной высоты выступания зерен над уровнем связки k_h ($0 < k_h < 1$). Тогда можно записать выражение для количества зерен на единице площади рабочей поверхности:

$$Z_S = Z_{S0} k_h = \frac{6}{\pi} \left(\frac{A}{d_{mean}} \right)^2 K_v k_h = \frac{6}{\pi} \left(\frac{A}{a_0 k_m} \right)^2 K_v k_h. \quad (10)$$

Относительная критическая глубина заделки зерен в связке [1] $\epsilon_{кр} = 1 - k_h$. Для практических расчетов можно принимать следующие значения: $k_h = 0,9 \dots 0,5$ для зерен из абразивных материалов; $k_h = 0,5 \dots 0,3$ для алмаза и КНБ. Разница в диапазонах значений определяется особенностями их строения.

Экспериментальное определение k_h соответствует нахождению отношения $Z_{S(факт)} / Z_{S0}$, где $Z_{S(факт)}$ находится непосредственным подсчетом зерен видимых на единице площади поверхности инструмента, а Z_{S0} определяется по (9).

Пример: $Z_S = 17,75$ шт/мм² ($A = 1000$; $d_{mean} = 164$ мкм; $K_v = 0,5$; $k_h = 0,5$).

Распределение вершин зерен на рабочей поверхности

Вероятностный характер процесса абразивной обработки заложен в самой природе инструмента. При определении статистически-обоснованного закона распределения вершин зерен на рабочей поверхности абразивного инструмента необходимо одновременно учитывать вероятностный характер распределения их центров и размеров. Рассмотрим случай, когда центра зерен распределены в исходном абразивном пространстве равномерно (равномерный закон распределения), а распределение размеров зерен соответствует нормальному закону (2).

Определение закона распределения вершин зерен относительно уровня связки будем выполнять в следующей последовательности [3]:

- Выполним сечение абразивного пространства плоскостью.
- Определим плотность распределения вершин зерен относительно секущей плоскости. Расстояние от вершины каждого отдельного i -го зерна до секущей плоскости будет равно: $y_i = c_i + d_i/2$, где c_i , - расстояние от центра зерна до секущей плоскости; d_i - размер зерна. Плотность результирующего распределения для случая суммирования взаимно независимых случайных величин будет представлять собой их композицию [10].
- Перейдем от абразивного пространства к полупространству (рабочей поверхности инструмента). Переход производится усечением результирующего закона распределения для отрицательных значений координат вершин зерен.

Теоретическая плотность вероятности распределения вершин зерен над поверхностью связки будет иметь следующий вид:

$$f_{GD}(y, \mu_{GD}, \sigma_{GD}) = \frac{1}{2 \mu_{GD}} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{y + \mu_{GD}}{\sqrt{2} \sigma_{GD}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{y - \mu_{GD}}{\sqrt{2} \sigma_{GD}} \right) \right]; 0 \leq y < \infty, \quad (11)$$

где μ_{GD} , σ_{GD} - параметры распределения; $\operatorname{erf}(z)$ - функция ошибки.

Функция ошибки $\operatorname{erf}(z)$ связана с функцией Лапласа (интегральной функцией стандартного нормального распределения) $\Phi(z)$ соотношением: $\operatorname{erf}(z) = 2 \Phi(\sqrt{2} z)$.

Вероятность распределения $F_{GD}(y, \mu_{GD}, \sigma_{GD}) = \int_0^y f_{GD}(y, \mu_{GD}, \sigma_{GD}) dy$:

$$F_{GD} = \frac{\sigma_{GD}}{2 \mu_{GD}} \left\{ z_1 \operatorname{erf} \left(\frac{z_1}{\sqrt{2}} \right) - z_2 \operatorname{erf} \left(\frac{z_2}{\sqrt{2}} \right) + \sqrt{\frac{2}{\pi}} \left[\exp \left(-\frac{z_1^2}{2} \right) - \exp \left(-\frac{z_2^2}{2} \right) \right] \right\}, \quad (12)$$

где $z_1 = (y + \mu_{GD}) / \sigma_{GD}$; $z_2 = (y - \mu_{GD}) / \sigma_{GD}$.

Вероятность распределения вершин зерен относительно уровня связки $F_{GD}(y, \mu_{GD}, \sigma_{GD})$ определяет относительное количество вершин зерен (относительно общего количества зерен на поверхности связки) в интервале $0 \dots y$, т. е. в слое между поверхностью связки и эквидистантной поверхностью расположенной на расстоянии y .

Особый интерес представляет взаимосвязь параметров закона распределения вершин зерен μ_{GD}, σ_{GD} с параметрами распределения их размеров μ_N, σ_N . Как показали модельные исследования [3], для нормального закона распределения диаметров зерен эта взаимосвязь имеет следующий вид:

$$\mu_{GD} = \mu_N k_h = a_0 k_m k_h; \quad \sigma_{GD} = \sigma_N k_h = a_0 k_m k_v k_h, \quad (13)$$

где k_h - коэффициент относительной высоты выступания зерен над уровнем связки.

Полученный теоретический закон распределения вершин зерен над поверхностью связки задан на интервале от 0 до ∞ . В реальности размер абразивных зерен ограничен значениями $d_{\max} = a_0 k_{\max}$ (табл. 1). Тогда, максимально возможная высота выступания зерен из связки $h_{\max}$ определится выражением: $h_{\max} = d_{\max} k_h = a_0 k_{\max} k_h$.

Требуемый закон распределения может быть получен усечением справа уравнения (11) до координаты вершины максимально выступающего зерна $h_{\max}$:

$$f_{GD}(y, \mu_{GD}, \sigma_{GD}) = \frac{k}{2 \mu_{GD}} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{y + \mu_{GD}}{\sqrt{2} \sigma_{GD}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{y - \mu_{GD}}{\sqrt{2} \sigma_{GD}} \right) \right]; \quad 0 \leq y < h_{\max}, \quad (14)$$

где k - коэффициент, компенсирующий усечение ($k > 1$, для практических расчетов $k \cong 1$): $k = 1 / \int_0^{h_{\max}} f_{GD}(y, \mu_{GD}, \sigma_{GD}) dy = 1 / F_{GD}(h_{\max}, \mu_{GD}, \sigma_{GD})$.

Математическое ожидание (ожидаемое среднее значение) высоты выступания зерен относительно уровня связки $h_{mean} = E_{GD} = \int_0^{\infty} y f_{GD}(y) dy$:

$$h_{mean} = E_{GD}(\mu_{GD}, k_v) = \mu_{GD} \frac{1}{2} \left[(1 + k_v^2) \operatorname{erf} \left(\frac{1}{\sqrt{2} k_v} \right) + \frac{k_v}{\sqrt{2} \pi} \exp \left(-\frac{1}{2 k_v^2} \right) \right], \quad (15)$$

где $\mu_{GD} = a_0 k_m k_h$; k_v - коэффициент вариации.

Для упрощения практических расчетов выражение для математического ожидания можно представить в виде $h_{mean} = E_{GD}(\mu_{GD}, k_v) = \mu_{GD} \phi_{EGD}(k_v)$, где $\phi_{EGD}(k_v)$ - аппроксимирующая функция, обеспечивающая относительную ошибку $\delta < 0,1\%$ для $k_v = 0,1 \dots 0,8$:

$$\phi_{EGD}(k_v) = \left(0,365 + 0,407 k_v + \frac{0,0277}{k_v + 0,178} \right). \quad (16)$$

Имея выражение для математического ожидания высоты выступления зерен над уровнем связки можно определить относительные количества (коэффициенты) зерен расположенных ниже k_c ($0 < y < h_{mean}$) или выше k_t ($h_{mean} < y < \infty$) уровня связки h_{mean} . Между собой эти коэффициенты связаны зависимостью $k_c + k_z = 1$ ($k_z = 1 - k_c$). Аналитически коэффициент k_c определяется подстановкой в функцию вероятности (12) распределения вершин зерен над уровнем связки $F_{GD}(y, \mu_{GD}, \sigma_{GD})$ параметров μ_{GD} , σ_{GD} (13) и значения аргумента $y = h_{mean}$ (15). Для более компактного вида полученное выражение $k_c = f(k_v)$ аппроксимировано с относительной ошибкой $\delta < 0,1\%$ для $k_v = 0,1 \dots 0,8$. Окончательно зависимости для относительного количества вершин зерен расположенных ниже k_c и выше k_z математического ожидания высоты выступления зерен h_{mean} имеют следующий вид:

$$k_c(k_v) \cong \frac{0,621 + (2,2829 k_v - 1,543) k_v}{1,259 + (4,7474 k_v - 3,359) k_v}; \quad k_z(k_v) = 1 - k_c(k_v). \quad (17)$$

Результаты расчетов (рис. 3) показывают незначительное изменение коэффициентов относительного количества зерен относительно значения 0,5, что позволяет для предварительных расчетов принимать $k_c \approx k_z \approx 0,5$.

Тогда, среднее количество зерен на единице площади рабочей поверхности, соответствующее средней высоте их выступления над уровнем условной поверхности связки с учетом (10) будет иметь следующий вид:

$$Z_{S mean} = Z_S k_z \approx 0,5 Z_S \approx \frac{3}{\pi} \left(\frac{A}{d_{mean}} \right)^2 \cdot K_V k_h \approx \left(\frac{A}{d_{mean}} \right)^2 K_V k_h. \quad (18)$$

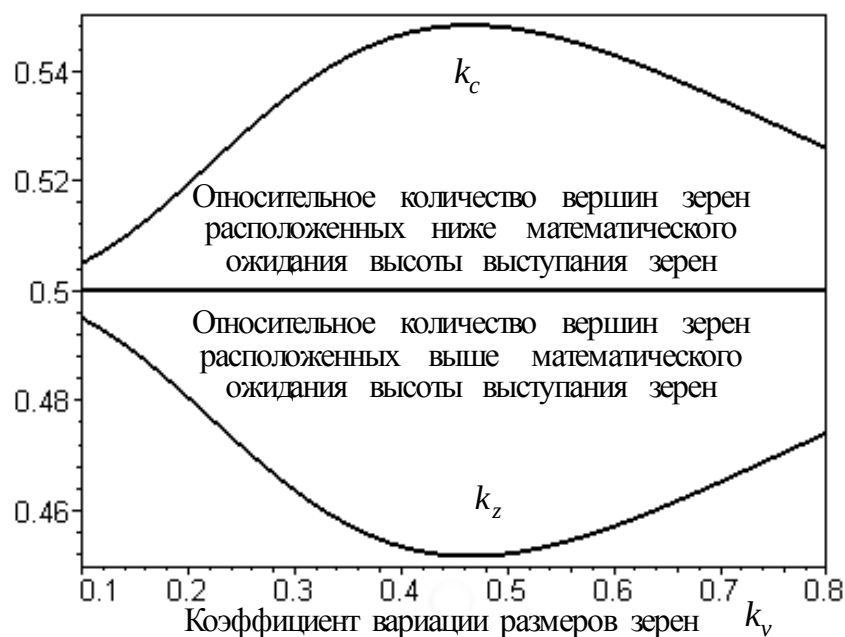


Рисунок 3 – Значения коэффициентов относительного количества вершин зерен

Типовой график плотности (14) и функции (12) распределения вершин зерен относительно уровня связки в относительных координатах (y/a_0) представлен на рис. 4. Параметры и характеристики распределения определялись для условий предыдущих примеров (для единичного характеристического размера $a_0 = 1$): $\mu_{GD} = 0,41 a_0$; $\sigma_{GD} = 0,11 a_0$; $h_{max} = 0,72 a_0$; $h_{mean} = 0,22 a_0$; $F_{GD}(h_{mean}) = 0,53$ ($k_m = 0,82$; $k_v = 0,27$; $k_h = 0,5$); $Z_{S mean} = 8,88 \text{ шт/мм}^2$ ($a_0 = 200 \text{ мкм}$).

Вопросы трансформации статистических характеристик рельефа рабочей поверхности шлифовальных кругов при износе зерен рассмотрены в [5].

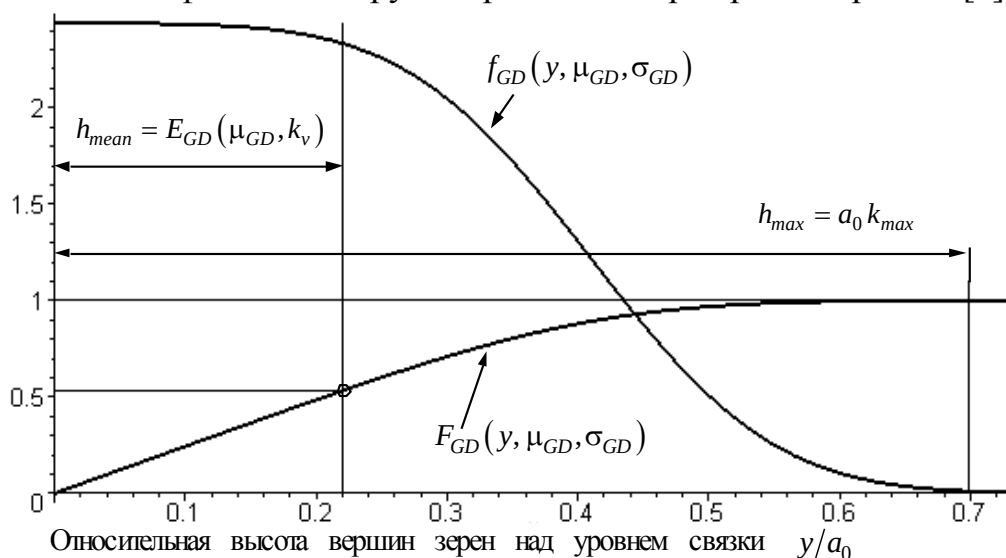


Рисунок 4 – Схема распределения вершин зерен над уровнем связки

Количество зерен на единице длины рабочей поверхности

Выполним сечение рабочей поверхности плоскостью, перпендикулярной условной поверхности связки. Количество зерен попавших в сечение будет в A/d_m раз меньше Z_S . Тогда имеем количество зерен на единице длины рабочей поверхности по уровню связки:

$$Z_L = \frac{6}{\pi} \frac{A}{d_{mean}} K_V k_h = \frac{6}{\pi} \frac{A}{a_0 k_m} K_V k_h. \quad (19)$$

Среднее количество зерен на единице длины рабочей поверхности, соответствующее средней высоте их выступания над уровнем условной поверхности связки получим аналогично (18):

$$Z_{Lmean} = Z_L k_z \approx 0,5 Z_L = \frac{3}{\pi} \frac{A}{d_{mean}} K_V k_h = \frac{3}{\pi} \frac{A}{a_0 k_m} K_V k_h. \quad (20)$$

Среднее расстояние (шаг) между зернами по уровню их средней высоты производится делением длины абразивного пространства A на Z_{Lmean} :

$$l_{Zmean} = \frac{A}{Z_{Lmean}} = \frac{\pi}{3} \frac{d_{mean}}{K_V k_h} = \frac{\pi}{3} \frac{a_0 k_m}{K_V k_h}. \quad (21)$$

Пример: $Z_{Lmean} = 1,46$ шт/мм; $l_{Zmean} = 0,687$ мм ($A = 1000$ мкм; $d_{mean} = 164$ мкм; $K_V = 0,5$; $k_m = 0,82$; $k_h = 0,5$).

Заключение

1. Разработана параметрическая вероятностная модель для определения характеристик распределения зерен на рабочей поверхности абразивных инструментов. Получен закон распределения вершин зерен и расчетные зависимости для определения средних значений количества зерен в единице объема, на единице площади и единице длины рабочей поверхности.

2. Обоснованна необходимость статистической параметризации (в дополнение к геометрической и физической) при решении задач предметной области абразивной обработки, связанных с исходными размерами абразивных порошков.

3. Статистическая параметризация обеспечивается модификацией параметров масштабируемых законов распределения с приведением их к трем: характеристическому размеру абразивных зерен, коэффициенту смещения математического ожидания относительно характеристического размера и коэффициенту вариации.

4. Предложенная параметризация повышает представительность и содержательность статистических выводов и может позволить выявлять общие закономерности формирования рабочей поверхности абразивного инструмента в процессе шлифования.

Список литературы: 1. Абразивная и алмазная обработка материалов: Справочник / Под ред. д-ра техн. наук проф. *А.Н. Резникова*. - М.: Машиностроение, 1977. - 391 с. 2. *Байкалов А.К.* Введение в теорию шлифования материалов. - К.: Наукова думка, 1978. - 207 с. 3. *Грабченко А.И., Доброскок В.Л., Федорович В.А.* 3D моделирование алмазно-абразивных инструментов и процессов шлифования: Учебн. пособие. - Харьков: НТУ "ХПИ", 2006. - 364 с. 4. *Доброскок В.Л., Гаращенко Я.Н., Наконечный Н.Ф.* Определение параметров распределения размеров зерен для абразивно-алмазных порошков по ГОСТ и ДСТУ // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". - Харків: НТУ "ХПІ", 2003. - № 8, Т. 1. - С. 71-86. 5. *Доброскок В.Л., Гаращенко Я.Н.* Трансформация статистических характеристик рельефа рабочей поверхности шлифовальных кругов при износе зерен // Наука і освіта: Зб. наук. праць. - Харків: НТУ «ХПІ». - 2004. - С. 83-98. 6. *Лавриненко В.И., Шепелев А.А., Петасюк Г.А.* Модели формы зерен СТМ. // Сверхтвердые материалы. - 1994. - № 5-6. - С. 18-21. 7. *Маслов Е.Н.* Теория шлифования материалов. - М.: Машиностроение, 1974. - 320 с. 8. *Островский В.И.* Теоретические основы процесса шлифования. - Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1981. - 144 с. 9. *Резников А.Н.* Теплофизика резания. - М.: Машиностроение, 1969. - 288 с. 10. Точность производства в машиностроении и приборостроении / Под ред. *А.И. Гаврилова*. - М.: Машиностроение, 1973. - 567 с.

В.А. ЗАЛОГА, д-р техн. наук, **К.А. ДЯДЮРА**, канд. техн. наук,
А.В. ПРОКОПЕНКО, Сумы, Украина

МЕТОДОЛОГИЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЗАИМОЗАВИСИМЫХ ПРОЦЕССОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ, ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ В ПРОЕКТАХ МАШИНОСТРОЕНИЯ

На основі моделі ендогенного науково-технічного прогресу (модель П. Ромера) запропонована модель спільної взаємодії функціональних підсистем проектування, виготовлення й експлуатації кожна з яких може мати самостійний характер застосування своїх результатів. Їхня інтеграція в загальну систему забезпечує якісно нову сукупність властивостей і міри корисності машинобудівного виробу виробничо-технічного призначення, а також підвищення техніко-економічних показників при його виготовленні й експлуатації.

На основе модели эндогенного научно-технического прогресса (модель П. Ромера) предложена модель совместного взаимодействия функциональных подсистем проектирования, изготовления и эксплуатации каждая из которых может иметь самостоятельный характер применения своих результатов. Их интеграция в общую систему обеспечивает качественно новую совокупность свойств и меры полезности машиностроительного изделия производственно-технического назначения, а также повышения технико-экономических показателей при его изготовлении и эксплуатации.

On the basis of model of endogenous scientific and technical progress (model of P. Romera) the model of joint co-operation of functional subsystems of planning, making and exploitation is offered each of which can have independent character of application of the results. Their integration in the general system provides high-quality the new aggregate of properties and measure of utility of machine-building good setting, and also increases of indexes at his making and exploitation.

Введение. В современных экономических и политических условиях важной проблемой, которая часто обсуждается как на высшем государственном так и на международном уровнях, является конкурентоспособность продукции, предприятий, экономики. При этом конкурентные позиции предприятий и государства на рынке во многом зависят от научно-технического уровня машиностроительной отрасли, которая является основным источником не только создания машин, оборудования, инструментов и т.п., но и существенно влияет на рост производительности труда в других отраслях и сферах экономики. Сегодня

неоспоримым фактом является то, что использование в машиностроительной отрасли новейших технологий и современных информационных средств оказывает непосредственное влияние на соотношение «цена-качество» на всех этапах жизненного цикла изделия (ЖЦИ).

Современный ЖЦИ представляет собой совокупность взаимосвязанных технических, экономических, социальных и иных систем, которые обладают различной степенью инерционности при их функционировании. Характерной особенностью рыночных условий на современном этапе развития общества является стремительное сокращение некоторых этапов ЖЦИ, в частности, таких как проектирования и изготовления, что связано с возрастанием требований к срокам создания и внедрения в производство новых изделий, а также технологий их изготовления, которые постоянно изменяются под воздействием научно-технического прогресса.

Обобщающим показателем развития государства считается экономический рост, который характеризуют следующие количественные показатели: объем выпуска продукции, темпы прироста труда и капитала, темпы роста валового национального продукта (ВНП) и валового внутреннего продукта (ВВП) и т.п.

В настоящее время теория научно-технического прогресса, признанная как решающий фактор экономического развития и лидирующая по числу публикаций в экономической литературе, к сожалению, используется, как правило, не для производственных целей. Она, к сожалению, пока еще не стала базовым инструментом формирования научно-технических программ и отбора инвестиционных проектов.

Наиболее известной моделью эндогенного научно-технического прогресса, которая основана на идее накопления человеческого капитала, является модель П. Ромера [1]. В модели предполагается, что в экономике существует три сектора: научно-исследовательский, производства средств производства (продукции производственно-технического назначения) и производства конечной продукции. Каждая сфера может иметь самостоятельный характер применения своих результатов, однако их совместное использование дает наибольший эффект. Их общий результат оказывает непосредственное воздействие на развитие производства и экономический рост как отдельной отрасли, так и государства в целом.

Постановка задачи. На основании анализа этапов ЖЦИ [2, 3, 4] можно установить, что машиностроительное изделие производственно-

технического назначения наиболее целесообразно рассматривать как композицию следующих уровней (рис. 1) [5]:

- изделие как объект проектирования и разработки.
- изделие как объект изготовления;
- изделие как объект эксплуатации;

При этом уровень эксплуатации изделия является первичным, уровень изготовления вторичным, а уровень проектирования и разработки – третичным. Все эти уровни взаимосвязаны между собой посредством прямых и обратных связей, которые обеспечивают непрерывные потоки информации об условиях эксплуатации изделия (технологической системы), а также об обеспечении свойств изделия на уровне проектирования и изготовления.

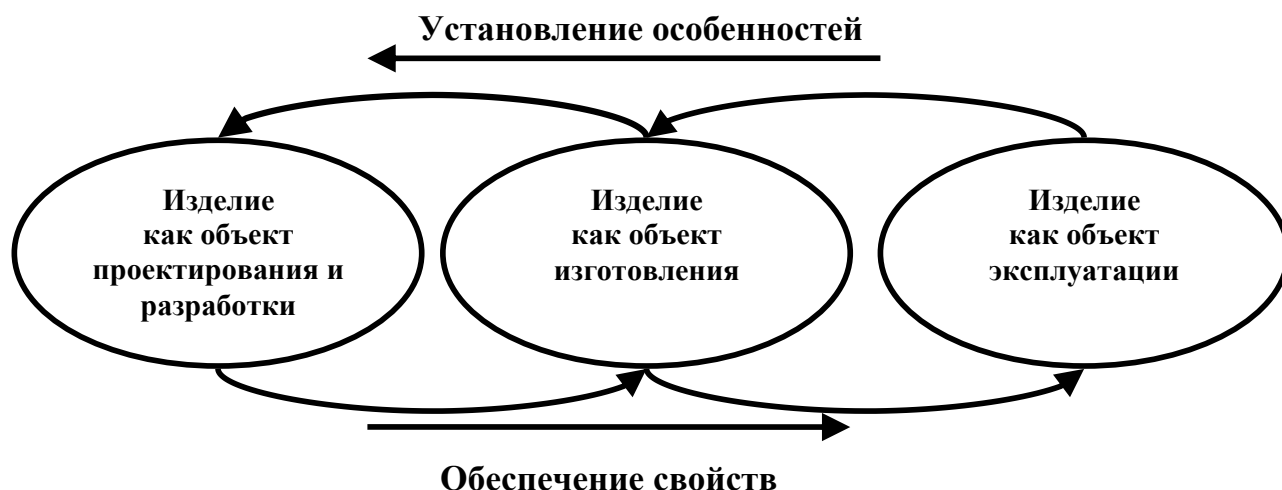


Рисунок 1 – Основные состояния изделия в процессе жизненного цикла

При проектировании и разработке вырабатывается концепция нового изделия, которая уточняется, анализируется и после проектной проработки материализуется в виде его характеристик и документируются в спецификациях, конструкторских чертежах, проектировочных расчетах и т.д. Определяются способы измерения и методы оценки соответствия характеристик требованиям заказчика и других заинтересованных сторон. Их значения используют на следующем этапе ЖЦИ – технологической подготовке производства для определения характеристик оборудования и последовательности технологических воздействий при изготовлении изделия. При этом характеристики продукции и процессов должны быть прослеживаемыми по отношению к документированным требованиям заказчика и других заинтересованных сторон. Поэтому связь между процессами проектирования и технологической подготовки производства является двусторонней, поскольку иногда (в зависимости от

экономической ситуации) требуется корректирование характеристик изделия в соответствии с существующими оборудованием и технологиями и наоборот. Изготовленное изделие поступает заказчику или потребителю, который использует его, исходя из своих потребностей, в соответствии с той документацией, которая сопровождает продукцию. В процессе эксплуатации проводится оценка соответствия характеристик изделия требованиям заказчика. Информация об отказах и других недостатках, а также об изменении условий применения передается на этап проектирования и разработки, что косвенно оказывает влияние и на технологическую подготовку производства. Взаимосвязь между процессами позволяет проводить измерение и анализ данных, применять корректирующие и предупреждающие действия и методы предотвращения потерь, чтобы способствовать постоянному улучшению текущих и будущих проектов с целью повышения их эффективности. Контроль процессов включает в себя контроль взаимодействий, способствующий устранению конфликтов или недоразумений.

Такой подход дает возможность учесть все функциональные особенности эксплуатации изделия в процессе его проектирования и изготовления.

Цель данной работы - разработка модели совместного функционирования процессов проектирования, изготовления и эксплуатации, которая обеспечивает качественно новую совокупность свойств и меры полезности машиностроительной продукции производственно-технического назначения, повышая тем самым ее конкурентоспособность.

Результаты исследований. Современные наукоемкие машиностроительные изделия, которые можно рассматривать как самостоятельно функционирующие единицы, являются, как правило, сложными техническими системами (СТС). Совокупность характеристик изделия определяется типом, составом и качеством большого количества входящих в него и взаимодействующих между собой элементов и подсистем, объединенных в систему для достижения определенной цели. Чем больше количество элементов, подсистем, связей между ними и состояний, в которых они могут находиться, тем более сложная техническая система. В свою очередь проектирование и изготовление изделия также осуществляется многофункциональными и многоэлементными системами.

В составе СТС в общем случае могут быть выделены три разнородных компонента [6] – комплекс технических средств (КТС), программное обеспечение (ПО) и оперативный персонал (ОП).

Под комплексом технических средств понимают совокупность технических устройств, взаимосвязанных между собой для выполнения каких-либо производственных задач. КТС классифицируют по сфере применения.

Программное обеспечение системы представляет собой совокупность программ (программных средств), используемых в составе системы в процессе ее функционирования. Все элементы ПО (средства, программы) разделяются на группы по признаку их участия в выполнении той или функции, в реализации которой участвует ПО. В результате образуются функциональные подсистемы ПО - ФП_{ПО}. Под функцией ПО понимается управление конкретными техническими, в первую очередь вычислительными, средствами системы. ФП_{ОП} могут иметь различную значимость для функционирования системы в целом и, соответственно, характеризоваться разным уровнем требований. В многофункциональной системе ПО может принимать участие в реализации нескольких функций. При этом в выполнении какой-либо одной функции могут участвовать не все входящие в состав ПО программы или программные средства.

Под оперативным персоналом понимают категорию работников, которые непосредственно воздействуют на органы управления, имеют право эксплуатационного обслуживания и выполнения оперативных переключений на оборудовании.

Основной задачей ОП в процессе функционирования системы считается выполнение определенной, заранее заданной процедуры (последовательности операций) при возникновении определенных условий (заданной ситуации). В выполнении процедуры могут участвовать один или несколько операторов. Качество выполнения ОП заданной процедуры определяется рядом требований (требования точности, быстродействия, последовательности выполнения операции и т.п.).

Указанные три компонента влияют на эффективность результата системы не изолированно, а в тесной взаимосвязи друг с другом, что выражается в возможностях одного компонента корректировать двумя другими эффективность реализации функций данной системы. Следует отметить, что между компонентами действуют пространственно-временные отношения.

В связи с тем, что системы являются многофункциональными и выполняемые ими функции могут существенно отличаться, при рассмотрении многих вопросов используется функциональный подход. При этом для рассмотрения вопросов по некоторой (j -й) функции из состава всех элементов выделяется группа технических, программных и эргатических (человек-оператор (или группа операторов)) элементов, участвующих в выполнении данной функции.

Эта группа элементов образует j -ю функциональную подсистему (j -я $\Phi ПС$ или $\Phi ПС_j$), рассматриваемой системы. Именно эта $\Phi ПС_j$ подлежит анализу при рассмотрении характеристик системы в отношении реализуемой ею j -й функции.

В состав $\Phi ПС_j$ (как и в состав системы в целом) в общем случае входят три компонента:

- группа участвующих в реализации j -й функции технических средств (j -я функциональная подсистема КТС – $\Phi П_{КТСj}$);
- группа участвующих в реализации j -й функции программных средств (j -я функциональная подсистема ПО – $\Phi П_{ПОj}$);
- группа участвующих в реализации j -й функции эргатического обеспечения (j -я функциональная подсистема ОП – $\Phi П_{ОПj}$).

По признаку участия в выполнении некоторой функции выделяются функциональные подсистемы, например, по конструктивным признакам могут выделяться конструктивные подсистемы, по информационным признакам – информационные подсистемы и т.д. Анализ функционирования системы существенно упрощается, если ее структура построена так, что выделяемые по функциональным и конструктивным признакам подсистемы совпадают.

Таким образом, система функций формирует характеристики функциональных подсистем $X_{\Phi ПС}$. При этом функции можно разделить на основные и вспомогательные. Основными считаются те, которые непосредственно формируют другие функции, вспомогательные – только те, что участвуют в этом процессе, т.е. только помогают формировать.

Между иерархией функций (преобразований) и иерархией функциональных подсистем существует соответствие. Взаимосвязь множества функций (Φ) и множества групп средств ($\Phi П_{КТС}$, $\Phi П_{ПО}$, $\Phi П_{ОП}$) определяется по уровням иерархии. На каждом уровне декомпозиции μ функции $\Phi_{lj}^{\mu} \in \Phi^0$ соответствует множество $\{\Phi П_{lj}^{\mu}\}_Y$ типов средств (j – индекс функции на уровне иерархии, l – количество функций на уровне

иерархии). Тип средства $\Phi\Pi_j \in \{\Phi\Pi_{ij}^\mu\}_Y$ обеспечивает принципиальную возможность выполнения функции $\Phi_{ij}^\mu \in \Phi^0$. Таким образом, задается множественное отображение системы Φ на подсистеме $\Phi\Pi C$.

Система средств строится по принципу взаимосвязи уровней: формируется множество элементарных средств $\Phi\Pi = \{\Phi\Pi^0, \Phi\Pi^1, \dots, \Phi\Pi^{\mu-1}\}$, каждое из которых обеспечивает выполнение отдельной элементарной функции множества $\Phi = \{\Phi^0, \Phi^1, \dots, \Phi^{\mu-1}\}$.

Возможность формирования различных вариантов характеристик функциональной подсистемы $X_{\Phi\Pi C_i}$ обеспечивается направленным выбором из множества $\{\Phi\Pi C^0\}$ совокупности элементов $\Phi\Pi_i \subset \Phi\Pi C^0$, которые обеспечивает выполнение множества функций $\{\Phi^0\}$:

Таким образом, функциональную подсистему можно представить в виде совокупности иерархически организованных множеств: элементарных функций Φ^N , групп средств ($\Phi\Pi_{KTC}$, $\Phi\Pi_{ПО}$, $\Phi\Pi_{ОП}$), участвующих в реализации функции на каждом уровне и соответствующих им характеристик $X_{\Phi\Pi C}$ (рис. 2.). Множество элементарных функций Φ^N по связям Θ^N определяет множество групп $\Phi\Pi C_{iN}^N$ и элементарных средств ($\Phi\Pi_{KTC_{iN}}$, $\Phi\Pi_{ПО_{iN}}$, $\Phi\Pi_{ОП_{iN}}$). Внутри множества $\Phi\Pi C^N$ по связям Θ^N формируется множество характеристик $X_{\Phi\Pi C}^N$ ($X_{\Phi\Pi C_i}^N \in X_{\Phi\Pi C}^N$), которые обеспечивают эффективность выполнения функций в условиях ограничений на параметры. Каждый элемент системы средств $\Phi\Pi_i \in \Phi\Pi C^0$ может быть описан помимо связей Θ и ε характеристиками готовности Γ и сдерживания C

$$\Phi\Pi^0 = \bigcup_{\mu=1}^N \Phi\Pi^\mu(\Theta^\mu, \varepsilon^\mu, \Gamma^\mu, C^\mu) \quad (1)$$

Множество характеристик $X_{\Phi\Pi C}^N$ можно представить двумя подмножествами: $X_{\Phi\Pi C_i}^\Gamma$, которое включает типы подсистем элементов, готовых к оперативному использованию, и подмножество $X_{\Phi\Pi C_i}^{\Gamma^*}$, которое включает типы подсистем и элементов, не готовых к оперативному использованию на момент времени t :

$$X_{\Phi\Pi C_i} = X_{\Phi\Pi C_i}^\Gamma \cup X_{\Phi\Pi C_i}^{\Gamma^*} \quad (2)$$



Рисунок 2 – Структура функциональной подсистемы

Реализация данного подхода отображена на схеме направленного формирования заданных свойств машиностроительных изделий (рис.3.). Характеристики качества продукции производственно-технического назначения $X_{ФПС_{II}}$ определяются типом, составом и диапазоном параметров функциональных подсистем и их элементов, которые выполняют различные функции в процессе проектирования и изготовления.



Рисунок 3 – Схема направленного формирования свойств изделий

Модель формирования характеристик готовой продукции X_{II} можно представить в виде следующих отображений (преобразований):

$$\left. \begin{aligned} \varphi_1: X_{II} &\rightarrow TP_{II} \\ \varphi_2: TP_{II} &\rightarrow X_{II} \\ \varphi_3: X_{II} &\rightarrow TP_{\Phi PC_{IIj}} \\ \varphi_4: TP_{\Phi PC_{IIj}} &\rightarrow X_{\Phi PC_{IIj}} \\ \varphi_5: X_{\Phi PC_{IIj}} &\rightarrow X_{\Phi PC_{II}} \\ \varphi_6: X_{\Phi PC_{II}} &\rightarrow X_{II} \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

где φ_1 – отображение (преобразование) характеристик качества конечной продукции X_{II} в множество требований к продукции производственно-технического назначения TP_{II} ; φ_2 – отображение (преобразование) требований TP_{II} в конструктивное описание изделия X_{II} ; φ_3 – отображение (преобразование) характеристик изделия X_{II} в требования к функциональным подсистемам изготовления изделия $TP_{\Phi PC_{IIj}}$; φ_4 – отображение (преобразование) $TP_{\Phi PC_{IIj}}$ в характеристики реально готовых к использованию функциональных подсистем изготовления $X_{\Phi PC_{IIj}}$; φ_5 – отображение (преобразование) $X_{\Phi PC_{IIj}}$ в характеристики изготовленной продукции производственно-технического назначения (характеристики изделия) $X_{\Phi PC_{II}}$; φ_6 – отображение (преобразование) $X_{\Phi PC_{II}}$ в характеристики конечной продукции X_{II} .

Для обеспечения требуемых характеристик конечной продукции на различных этапах ЖЦИ (продукции производственно-технического назначения) может быть использована модель реализации соответствующих преобразований (рис. 4), которая включает:

$I_j^i(t_K)$ – информационное воздействие i -го типа на j -й объект в момент времени t_K ;

$E_j^i(t_K)$ – энергетическое воздействие i -го типа на j -й объект в момент времени t_K ;

$S_j^i(t_K)$ – материальное воздействие i -го типа на j -й объект в момент времени t_K .

$\Phi ПС_j$ - j -ая функциональная подсистема;

$\Phi П_{КТС_j}$ - группа участвующих в реализации j -й функции технических средств (j -я функциональная подсистема КТС);

$\Phi П_{ПО_j}$ - группа участвующих в реализации j -й функции программных средств (j -я функциональная подсистема ПО);

$\Phi П_{ОП_j}$ - группа участвующих в реализации j -й функции эргатических средств (j -я функциональная подсистема ОП).

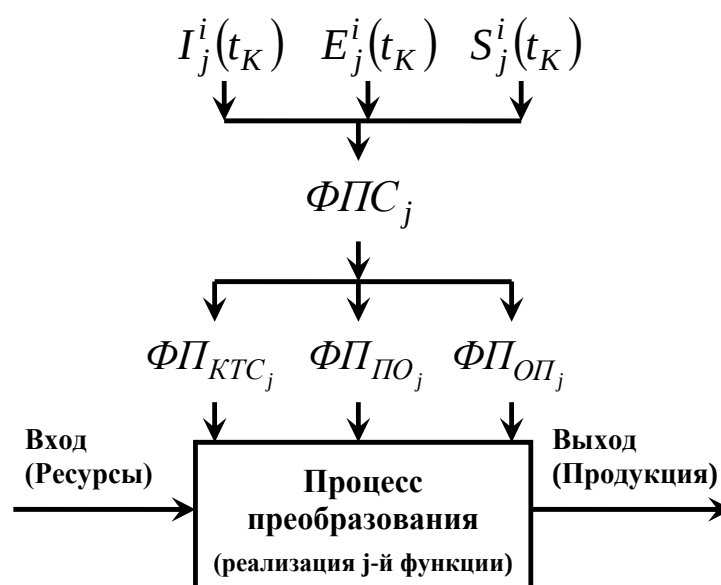


Рисунок 4 – Модель преобразований в процессах ЖЦИ

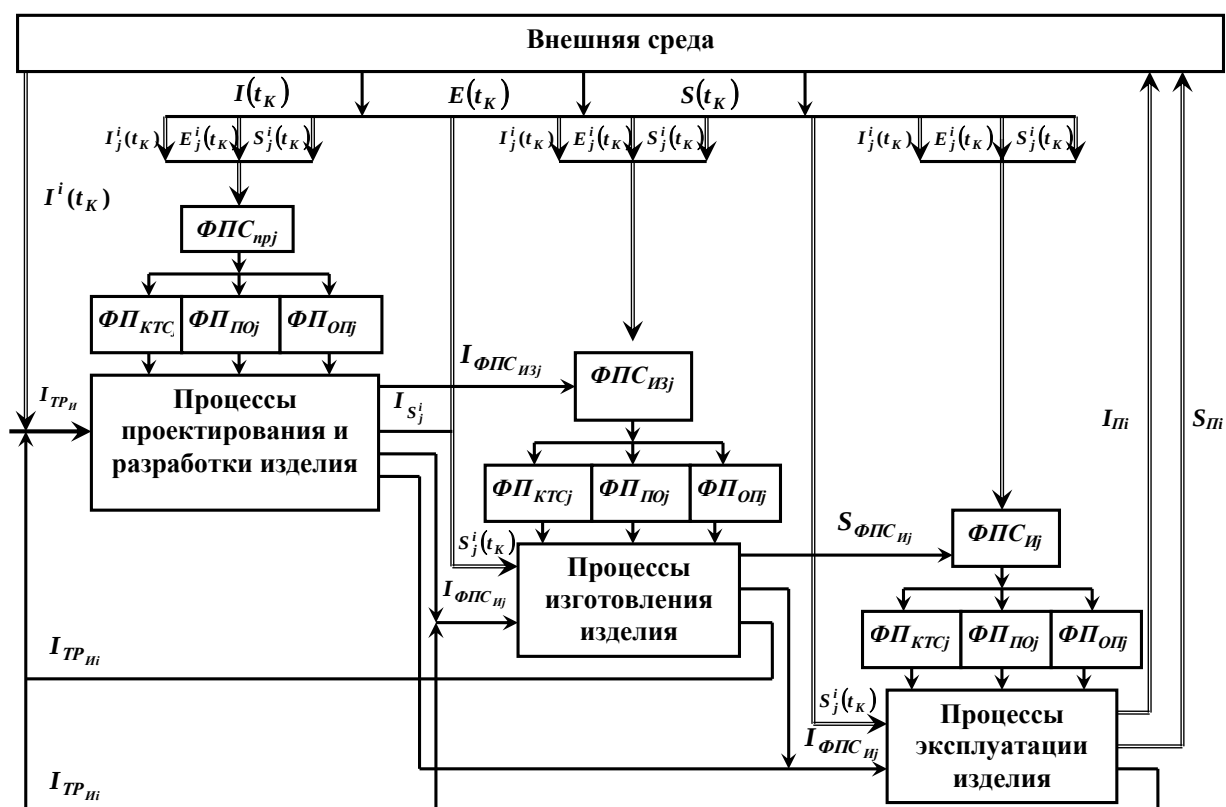
Таким образом, модель системы преобразований состоит из объектов (элементов, функциональных подсистем) определенного иерархического уровня: технических ($\Phi П_{КТС_j}$), программных средств ($\Phi П_{ПО_j}$) и оперативного персонала ($\Phi П_{ОП_j}$), являющихся одновременно операторами и операндами системы.

Они осуществляют целенаправленное воздействие материального $S_N(t_K)$, энергетического $E_N(t_K)$ и информационного $I_N(t_K)$ типов на объект преобразования.

Исходя из этого, процессы ЖЦИ могут быть представлены следующей структурной схемой (рис. 5), где они взаимосвязаны и находятся в единой системе.

На вход процесса проектирования и разработки поступает информация $I_{ТП}$, которая включает:

- В результате процесса проектирования и разработки осуществляется изменение состояния продукции от формулировки требований (технического задания) по созданию (модернизации) до воплощения их в новых (модернизированных) опытных образцах, конструкторской ($I_{TP_{II}}$), технологической ($I_{\Phi ПС_{из}}$) и др. документации проекта.



$\Phi ПС_{Иj}$ - функциональная подсистема j-го изделия;

$\Phi ПС_{ИЗj}$ - функциональная подсистема изготовления j-го изделия;

$\Phi ПС_{ПРj}$ - функциональная подсистема проектирования j-го изделия;

$I_{ТР_{И}}$ - информация содержащая требования к изделию;

$I_{\Phi ПС_{ИЗ}}$ - информация содержащая требования к функциональной подсистеме изготовления изделия;

$I_{\Phi ПС_{И}}$ - информация содержащая требования к условиям изготовления и

эксплуатации изделия;

$S_j^i(t_K)$ - материалы и комплектующие для изготовления изделий;

$S_{\Phi PC_{II}}$ - изготовленное изделие (продукция производственно-технического назначения).

На основе информации об изделии ($I_{\Phi PC_{II}}$), характеристик функциональной подсистемы ΦPC_{Iz_j} , материалов и комплектующих $S_j^i(t_K)$ изготавливают продукцию производственно-технического назначения ΦPC_{II_j} и проводят контроль качества и промышленные испытания.

Процессы эксплуатации ΦPC_{II_j} связаны с реализацией, поддержанием и восстановлением качества изделия. В результате функционирования системы ЖЦИ на ее выходе образуется два потока: материальный поток S_{II_i} (готовая конечная продукция) и информация о готовой конечной продукции I_{II_i} и продукции производственно-технического назначения $I_{TP_{II}}$.

При взаимодействии функциональных подсистем ΦPC_j (ΦPC_{II_j} ; ΦPC_{Iz_j} ; ΦPC_{II_j}) и их элементов (ΦPC_{KTC_j} , ΦPC_{PO_j} , ΦPC_{OP_j}), возникают проблемы взаимосвязи целей и задач, выбора рациональных диапазонов характеристик. Одна и та же задача может быть решена различными средствами. Любая функциональная подсистема ΦPC_j является частью системы более высокого порядка, ее развитие происходит во взаимодействии с объектами внешней среды (окружающего мира). Связи с внешней средой определяют совокупность тенденций развития изделия на этапах ЖЦИ, его функционирование в системах высшего порядка. Перечень и характеристики критериев предпочтения ΦPC_j и комплексы мероприятий по их совершенствованию направлены на выполнение целевых требований ЖЦИ, за счет развития элементов подсистем. Изменения целевых требований в системах высшего порядка – экономических, экологических и других потребностей, формирует комплексные критерии предпочтения характеристик изделия ΦPC_{II_j} . Принципиальными особенностями процессов ЖЦИ является динамика и неопределенность затрат, сроков, результатов и других параметров.

Выводы. Для создания машиностроительной продукции производственно-технического назначения, которая отвечает современным требованиям потребителя, наиболее перспективным является системный подход на основе использования совокупности взаимосвязанных технических, экономических, социальных и иных подсистем на этапах проектирования, изготовления и эксплуатации в рамках постоянно совершенствуемых интегрированных информационных технологий. Это создает условия для обеспечения качественно новой совокупности свойств и меры полезности изделий, а также повышения их конкурентоспособности.

Одним из основных методологических принципов системного подхода является адекватное определение входов, выходов и состояний каждого из исследуемых процессов и схемы их взаимодействия. Возможность формирования различных вариантов характеристик изделия обеспечивается заданием множества подсистем и элементов, которые могут реализовать различные его функций. Для этого широко должны быть использованы комплексные системы диагностики, контроля и управления, а также новые принципы работы оборудования и методы воздействия орудий и средств обработки на изделия. Предложенные модели эндогенного научно-технического прогресса отражают интегрированный результат проявления свойств и функционирования всех подсистем и элементов ЖЦИ, направленных на изготовление конкурентоспособной готовой продукции.

Список литературы: 1. Romer P.M. The origins of endogenous growth // J. Econ. Perspect. 1994. Vol. 8. P. 3 - 22. 2. Залога В.А., Дядюра К.А. К вопросу о выборе стратегии отечественных машиностроительных предприятий в отношении конкурентоспособности продукции// Високі технології в машинобудуванні: Збірник наукових праць НТУ «ХПІ». – Харків, 2007. – Вип. 2 (15). – 281 с. 3. Дядюра К.О. К автоматизации системы управления производством // Компрессорное и энергетическое машиностроение. Сумы – сентябрь №3(9), 2007 – С.42-43. 4. Залога В.А., Нагорный В.М., Дядюра К.А., Нагорный В.В. Математическая модель системы жизненного цикла машиностроительного изделия // Сучасні технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. – Вип. 3 – Харків: НТУ „ХПІ”, 2009. – С. 251 – 260. 5. Михайлов А.Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий машиностроения. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с. 6. ДСТУ 3524-97 Надійність техніки. Проектна оцінка надійності складних систем з урахуванням технічного і програмного забезпечення та оперативного персоналу. Основні положення.

С. С. КОВАЛЬЧУК, канд. техн. наук,
О. В. МАЗУРЕЦЬ, Хмельницький, Україна

ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ЯК ЗАСОБУ КОМПЛЕКСНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ МЕТАЛОРІЖУЧОГО ІНСТРУМЕНТУ

У статті викладено аналіз можливості моделювання життєвого циклу метало­рі­жучого інструменту як системи моделей, кожна з яких відповідає певному етапу життєвого циклу інструменту. Доведено, що моделювання процесу виконання наступних етапів життєвого циклу інструменту дозволяє значно зменшити потужність зворотних зв'язків і, відповідно, підвищити ефективність всього циклу та зменшити затрати на його реалізацію. Розглянуто особливості моделювання елементів життєвого циклу інструменту, сформовано необхідний методологічний апарат.

В статье проведено анализ возможности моделирования жизненного цикла металло­ре­жущего инструмента как системы моделей, каждая из которых отвечает определенному этапу жизненного цикла инструмента. Доказано, что моделирование процесса выполнения последующих этапов жизненного цикла инструмента позволяет значительно уменьшить мощность обратных связей и, соответственно, повысить эффективность всего цикла и уменьшить затраты на его реализацию. Рассмотрено особенности моделирования элементов жизненного цикла инструмента, сформировано необходимый методологический аппарат.

In article analysis of the possibility of modeling of the life cycle of the instrument is stated as systems of the models, each of which corresponds to the certain stage of the life cycle of the instrument. It is proved, that modeling of the process of the execution following stage life cycle of the instrument allows vastly to reduce the power of the feedbacks and, accordingly, raise efficiency of the whole cycle and reduce the expenses on its realization. The considered particularities of modeling life cycle element of the instrument and is formed necessary set of the methods.

Вступ

Моделювання функціонування штучних систем у багатьох галузях науки допомагає підвищити їх ефективність та зменшити затрати на них. Особливо це відчутно у випадку, коли моделювання охоплює всі стадії життєвого циклу систем. Оптимізація життєвого циклу метало­рі­жучого інструменту в машинобудуванні є однією з таких задач.

Проте сучасні роботи в даному напрямку присвячені або систематизації моделей [1, 2], або апроксимації функціональних аспектів

певних моделей до функціональних аспектів всієї системи [3, 4]. Відповідно, робота в означеному напрямку є актуальною.

З точки зору системного аналізу [5] моделювання функціонування штучних систем є найбільш ефективним тоді, коли моделювання охоплює весь її життєвий цикл. Однак у випадку із моделюванням життєвого циклу металоріжучого інструменту, яке є одночасно складною і комплексною задачею, системне моделювання, на думку авторів, найбільш ефективно розглядати як систему моделей. Кожна із таких моделей відповідає певному етапу життєвого циклу інструменту.

У попередніх публікаціях авторів було розглянуто класифікацію типів та методику вибору моделей [6], а також приклади й аналіз ефективності застосування ряду моделей процесів різання як елементів загальної системи для збільшення життєвого циклу металоріжучого інструменту [7]. Метою даної статті є аналіз життєвого циклу металоріжучого інструменту як композитної системи та опис моделей, які відповідають певним етапам життєвого циклу інструменту, та взаємозв'язків між ними.

Основна частина

Системний аналіз вимагає для повноцінної роботи із штучною системою розгляду всього її життєвого циклу, від ідеї концептуальної формалізації до повернення ресурсів у зовнішнє середовище [5]. Відповідно до цього, повний життєвий цикл інструменту складається з наступних етапів (Рисунок 1):

Цільова формалізація – заходи, що стосуються постановки завдання виробництва: визначення необхідності виробництва цільової продукції; експлуатаційні, технічні, технологічні та економічні вимоги до продукції, а також призначення, особливості застосування, терміни виробництва й ін.. У наступних етапах життєвого циклу інструменту елементи цільової формалізації виступають в якості обмежень відповідного характеру.

Геометричне моделювання – створення засобами САПР креслення розроблюваного інструменту, що відображає остаточний зовнішній вигляд та всі геометричні параметри інструменту. Вхідною інформацією для геометричного моделювання служить зведення цільової формалізації, а вихідною – креслення (звичайно цифрове) інструменту.

Технологічне моделювання – розробка засобами САПР ТП технологічного процесу виготовлення інструменту (що включає, у разі необхідності, процес складання). Основною вимогою при технологічному моделюванні є можливість виготовлення інструменту, спроектованого в

результаті геометричного моделювання, існуючими на підприємстві засобами та відповідність вимогам цільової формалізації. Вхідною інформацією для технологічного моделювання служить цифрове креслення інструменту, а вихідною – технологічний процес виготовлення інструменту.

Виробничий процес – виготовлення інструменту із заготовок у відповідності до розробленого технологічного процесу. Технологічний процес включає процес складання, якщо він передбачений на етапі технологічного моделювання. Вхідною інформацією для виробничого процесу є технологічний процес виготовлення інструменту, а вихідною – готова продукція.

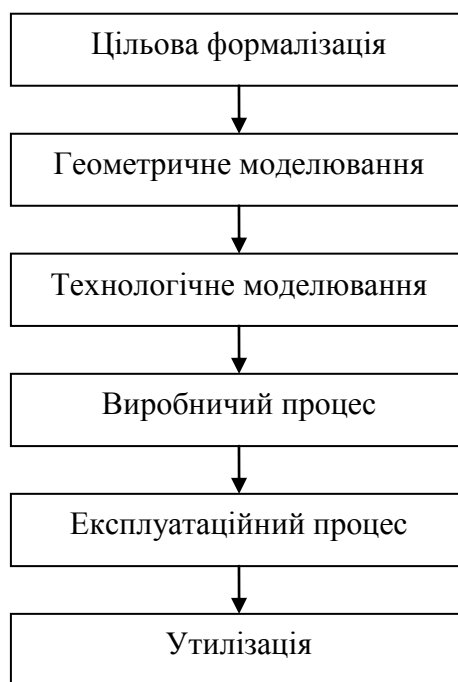


Рисунок 1 – Схема життєвого циклу інструменту

Експлуатаційний процес – основний і цільовий етап життєвого циклу інструменту, в ході якого інструмент використовується за призначенням. На початку експлуатаційного процесу визначено інструмент як готову продукцію, а завершення експлуатаційного процесу характеризується припиненням виконання інструментом функцій, відповідних його призначенню. Припинення функціонування інструменту може мати широкий спектр причин: технічне чи моральне старіння, остаточний фізичний знос, невідновна поломка та ін..

Утилізація – завершальний етап життєвого циклу інструменту, що характеризується припиненням існування інструменту як виробу й як

функціональної одиниці. При необхідності, процес утилізації включає процес розбирання. Вхідним матеріалом у процесі утилізації є інструмент, що підлягає утилізації, а також технологічні процеси утилізації й розбирання. Вихідним матеріалом є брухт, відходи та сировина.

Кожному з наведених етапів життєвого циклу інструменту характерні свої власні методи моделювання, призначені для оптимізації широкого спектру параметрів виробу.

Звичайно взаємозв'язки між етапами життєвого циклу інструменту є наступними: прямі послідовні; зворотні.

В рамках прямих послідовних зв'язків (Рисунок 1) на наступний етап передається інформація про результат виконання попередніх етапів і обмеження на виконання наступних.

Зворотні зв'язки виражають зворотну реакцію, що виникає при виконанні відповідного етапу, й переважно мають корективний характер.

На рисунку 2 наведено приклад можливих зворотних зв'язків, що виникають внаслідок корекційного впливу критичних ситуацій при експлуатаційному процесі. Нехай в процесі експлуатації різця виявилось, що при контакті заготовки й ріжучої кромки відбувається критичний перепад навантаження (Рисунок 3,а) на ріжучий інструмент під час врізання внаслідок виникнення лінійного контакту заготовки й ріжучої кромки [7]. Корекційний вплив при цьому буде наступним. Генеральний зворотний вплив буде спрямований на етап геометричного моделювання: при зміні профілю різця із прямого на радіальний критичний перепад навантаження на ріжучий інструмент буде усунуто (Рисунок 3,б). Однак зміна геометричних параметрів різця буде мати наслідком корекцію техпроцесу його виготовлення (вплив на технологічне моделювання), що внесе зміни у виробничий процес, аж після чого експлуатаційний процес буде оптимізовано. При цьому змінений продукт може мати відкориговану область застосування (вплив на цільову формалізацію) та дещо інший процес утилізації.

В залежності від особливостей критичних ситуацій, генеральний зворотний вплив може бути спрямований на різні етапи життєвого циклу інструменту, однак загальний вплив є звичайно глобальним в рамках всіх етапів.

Основною рисою зворотних зв'язків є те, що вони направлені на виправлення допущених на попередніх етапах помилок. Моделювання процесу виконання наступних етапів дозволяє значно зменшити потужність зворотних зв'язків і, відповідно, підвищити ефективність всього циклу та зменшити затрати на його реалізацію. Адже встановлено,

що виправлення помилки при моделюванні наступного етапу має на порядок меншу вартість, ніж виправлення помилки шляхом зворотної корекції на один крок назад.

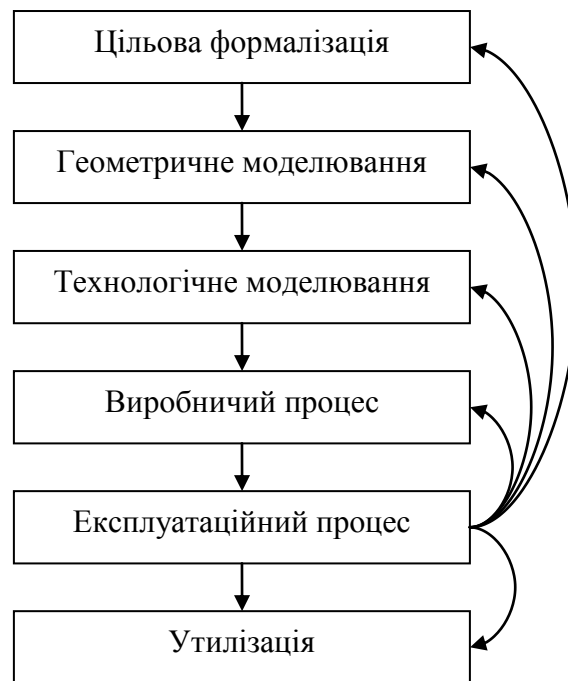
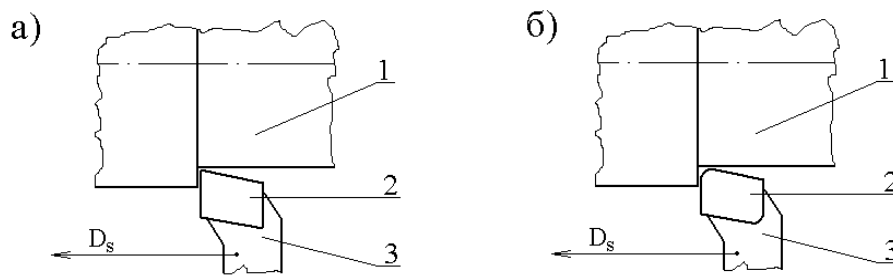


Рисунок 2 – Можливі зворотні зв'язки від експлуатаційного процесу

Моделювання є дослідженням об'єктів на їхніх моделях, тобто побудова й вивчення моделей реально існуючих предметів й явищ. У розглядуваній області застосування найбільш прийнятним є моделювання аналогове – один з видів моделювання, заснований на ізоморфізмі процесів, що мають різну природу, але описуваних однаковими математичними моделями. З огляду на специфіку процесів, що мають моделюватися, оптимальним способом моделювання є емуляція, тобто імітація роботи однієї системи засобами іншої без втрати функціональних можливостей і спотворень результатів. Емуляція звичайно виконується програмними засобами, тому можна зробити висновок, що всі етапи життєвого циклу металоріжучого інструменту можуть бути змодельованими за допомогою ЕОМ.

Граф корекційного впливу модельованих етапів життєвого циклу металоріжучого інструменту є повнозв'язним, тобто зміна параметрів однієї моделі може мати вплив на стан інших моделей. Таким чином, кількість ітерацій при моделюванні життєвого циклу металоріжучого інструменту є близькою до нескінченності, й відповідно задача оптимізації життєвого циклу інструменту не має ідеального розв'язку. Замість цього пропонується застосування методу генетичних алгоритмів, який у

залежності від кількості пройдених поколінь дасть можливість отримати набори параметрів відповідного рівня оптимальності для кожного з етапів.



1) заготовка; 2) ріжуча пластина; 3) різцетримач.

Рисунок 3 – Приклади варіантів врізання

Висновки

Таким чином, у статті викладено аналіз можливості моделювання життєвого циклу металоріжучого інструменту як системи моделей, кожна з яких відповідає певному етапу життєвого циклу інструменту. Доведено, що моделювання процесу виконання наступних етапів життєвого циклу інструменту дозволяє значно зменшити потужність зворотних зв'язків і, відповідно, підвищити ефективність всього циклу та зменшити затрати на його реалізацію. Розглянуто особливості моделювання елементів життєвого циклу металоріжучого інструменту, сформовано необхідний методологічний апарат.

Список літератури: 1. Пономарев Л.Д. Диагностирование – как системный подход к управлению // Збірник наукових праць „Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем”, Випуск 13. Краматорськ – Київ – 2003. – С.126-131. 2. Силин Р.И. Человек и Вселенная. – Хмельницький: ХНУ, 2007. 133с. 3. Юрчишин І.І., Винник В.В., Винник Т.В. Застосування агрегатно-модульного принципу побудови складального обладнання // Інформатизація та нові технології. - 1995, N 3-4. - С. 33 - 34. 4. Фролов В.В. Применение принципа изоморфизма при построении структуры процесса механической обработки.// Вестник ХГПУ.– 2000.– №80 – С.65–67. 5. Старіш О.Г. Системологія. – Київ: Центр навчальної літератури, 2005. – 232с. 6. Ковальчук С.С., Мазурець О.В. Системний підхід до використання спеціалізованих баз знань як засобу комплексної структуризації простору рішень технологічних задач // Збірник наукових праць за матеріалами третьої всеукраїнської науково-технічної конференції «Актуальні проблеми комп'ютерних технологій 2009» – Хмельницький – ХНУ, 2009. – С.62–68. 7. Ковальчук С.С., Мазурець О.В., Рибак Л.П. Врахування критеріїв надійності роботи інструменту при автоматизованому проектуванні техпроцесів // Международный научно-технический сборник „Резание и инструмент в технологических системах”. Харьков НТУ «ХПИ» – 2007. – С.112–118.

J. KUNDRÁK, DSc, *G. SZABÓ*, *GY. VARGA*, PhD, Miskolc, Hungary

FINITE ELEMENT MODELLING OF SHEAR IN HARD TURNING

Вирішено найважливішу проблему вибору оптимальної фінішної операції при обробці внутрішніх поверхонь загартованих сталей. Запропоновано параметри, за допомогою яких представляється можливим здійснювати вибір оптимальної операції точіння або шліфування. Порівняльний аналіз ефективності застосування цих операцій показав, що операція точіння внутрішніх отворів, у яких відношення довжини до діаметра не перевищує 1,1 є кращою.

Решена важнейшая проблема выбора оптимальной финишной операции при обработке внутренних поверхностей закаленных сталей. Предложены параметры, с помощью которых представляется возможным осуществлять выбор оптимальной операции точения или шлифования. Сравнительный анализ эффективности применения этих операций показал, что операция точения внутренних отверстий, у которых отношение длины к диаметру не превышает 1,1 является предпочтительной.

The major problem of a choice of optimum finishing operation is solved at processing internal surfaces tempered of steels. Parameters by means of which it is obviously possible to carry out a choice of optimum operation turning or grindings are offered. The comparative analysis of efficiency of application of these operations has shown, that turning operation internal apertures at which the attitude of length to diameter does not exceed 1,1 is preferable.

1. INTRODUCTION

Nowadays, because of the increased loads, engineering industrial products require better and better accuracy, quality (e.g. wear resistance, etc.). One fulfilment method of this requirement can be solved by the increase of the number of hard, hardened surfaces (>45 HRC) on the components. As conventional finish machining, grinding has a tested, well established technology, although it can be noted that the material removal rate and the possibility of concentration of operations are relatively low. The appearance and spread of super hard tool materials (e.g. PCBN) opened way to finish machining (e.g. hard turning) of hardened steels by cutting tools having single point cutting edges. Because of the characteristics (e.g. strength, etc.) of the material of workpiece and the material of the PCBN tool, the process of chip removal is entirely different from conventional turning. The mechanism of chip removal in hard turning can be explained by mechanic and thermo dynamic processes. By

the Finite Element (FEM) simulation we wish to prove, on the base of scientific literature [2, 3, 11], the special shape of the chip and the mechanism of chip removal [3].

2. CHIP REMOVAL IN HARD TURNING

In hard turning chips with special morphology can be removed. The shape of the chip removed, according to the scientific literature, can be seen in Figure 1 [2].

The shape of the removed chip is segmented (like a saw-tooth), the formation mechanism of which can be explained on the base of Figure 2 as well [3]. The chip removal begins with shearing from point B' being at the tip of the tool and it is accomplished along the B'D' line. While the tool reaches point A from B', there is a thermal tempering for a while, later this interval gets back to its original strength and along the BE interval it bonds into the direction of the flank of the tool. The extent of bulge of the tooth shape depends on values of Ψ [3]. As the Ψ changes periodically, according to the designation in Figure 2, in case of $\Psi < \Psi'$ point C is situated on interval DD', while in case of $\Psi > \Psi'$ it remains on BD interval according to the designation in Figure 2.

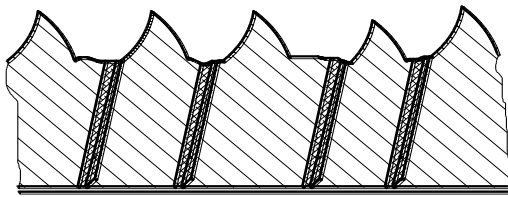


Figure 1 – Shape of chip can be removed at hard turning [2]

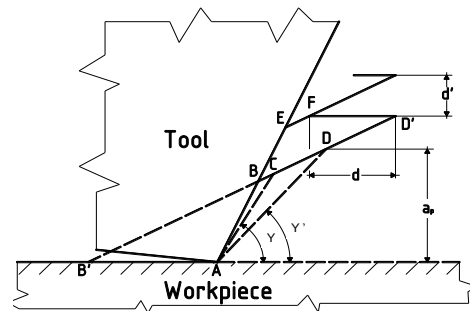


Figure 2 – A supposed mechanism of chip formation in hard turning [3]

3. MODELLING OF CHIP FORMATION IN HARD TURNING

Nowadays, one of the most effective analysing, simulation procedures of physical processes is the Finite Element Method (FEM). For investigation of plastic strain rates at the root of the chip we have the 2D version of the Third Wave AdvantEdgeTM 5.3 program package, which is optimised for cutting processes. By this program package we can examine the process characteristics in orthogonal cutting, that is why the input data have to satisfy these requirements. That is, the geometrical data of the cutting tool need to be defined in the tool-orthogonal plane. The program starts from the Johnson-Cook equation for calculation of the strain and strain rate [4, 6]:

$$\sigma_{red} = (A + B \cdot e^n) \cdot \left(1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon_0} \right) \right) \cdot \left(1 - \left(\frac{T - T_{room}}{T_m - T_{room}} \right) \right)^m \quad (1)$$

Where σ_{red} is the reduced, ε is the plastic strain, $\dot{\varepsilon}$ is the plastic strain rate, $\dot{\varepsilon}_0$ is the reference plastic strain rate, T is the temperature of workpiece, T_m is the melting temperature of workpiece material, T_{room} is the room temperature, coefficient A is the yield strength, B is the hardening modulus, and C is the strain rate sensitivity coefficient, n is the hardening coefficient, and m is the thermal softening coefficient.

For the definitions of designations showed above, and their interpretation we cannot give more details because of lack of space, they can be found in the quoted literature [5]. The values of Johnson-Cook type parameters of workpiece material are summarised in Table 1.

Table 1 – The values of parameters of Johnson-Cook equation for material 16MnCr5 [6]

$\sigma_{red} [MPa]$	$A [MPa]$	$B [MPa]$	C	n	m
400	588	680	0.057	0.4	0.7

In the simulation the data of our previous experiments were used as follows [7]:

Material of the workpiece:	16MnCr5 (60±2HRC),
Sizes of the workpiece:	$d_w=48$ mm, $\ell_w=27.35$ mm
Tensile strength of the workpiece:	$R_m=900$ MPa
Machine tool:	EEN-400/HUNOR PNC-712
Insert:	CNGA 120408 S01020 Sandvik Coromant
Shank:	S32U PCLN L12 TIZIT
Edge geometry:	$\gamma_{n1}=-26^\circ$ $\gamma_{n2}=-6^\circ$, $\alpha=6^\circ$, $\kappa_r=95^\circ$, $\varepsilon_r=80^\circ$, $r_\varepsilon=0.8$ mm (facet: $-20^\circ \times 0.15$ mm)
Cutting data:	$v_c=90 \dots 150$ m/min $f=0.05 \dots 0.25$ mm/rev; $a_p=0.1 \dots 0.5$ mm

During the Finite Element Simulation we intended to prove the correctness of chip formation which was published by [3] and can be seen in Figure 2. In Figure 3 an example is shown – by the help of Finite Element Simulation – for isotherm (Fig. 3a) and a developing adiabatic (Fig. 3b) chip removal process. The theoretic basis of this is that the cutting tool, penetrating into the hardened steel, first shears the material along the supposed first shear zone according to Figure 3. Then, the hardened steel creeps, so a significant

amount of heat emerges in this phase of chip removal. This amount of heat, at the moment of chip separation, practically sticks in the material between the two „saw-teeth” and the heat transmission in the direction of sheared „saw-teeth” is minimal only, so it can be named approximately as adiabatic chip removal.

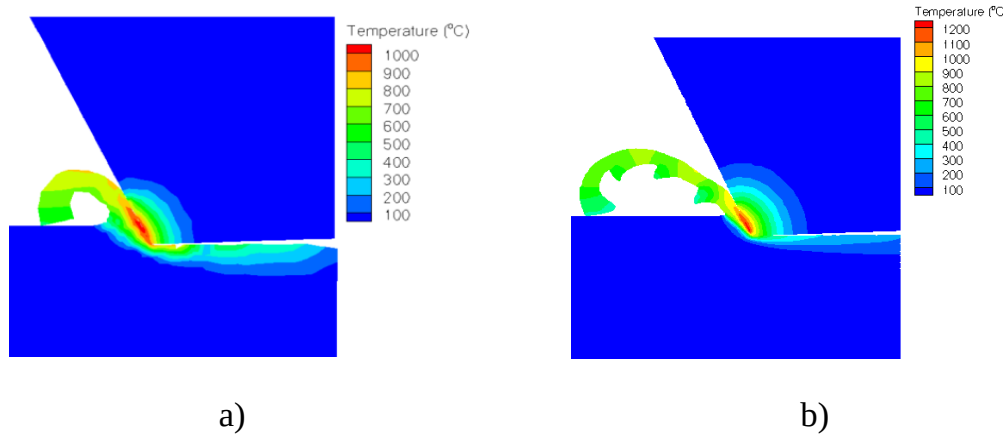


Figure 3 – Examples for the „isotherm” and „adiabatic” chip removal

The results of FEM calculations can be seen in Figures 4-6 with different values of cutting speed in case of constant value of feed ($f=0.1\text{mm/rev}$) and depth of cut ($a_p=0.2\text{ mm}$).

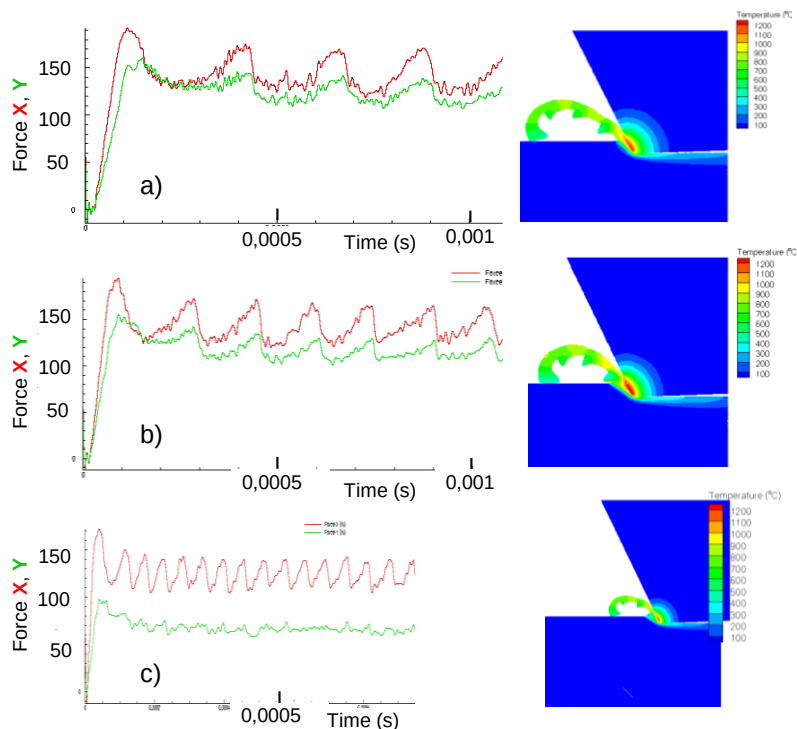


Figure 4 – Development of main cutting force and axial cutting force components versus the main cutting speed (v_c) and the change of length of spacing of saw-tooth originating from shear, as the function of cutting speed ($f=0.1\text{mm/rev}$, $a_p=0.2\text{ mm}$): a) $v_c=90\text{m/min}$; b) $v_c=120\text{m/min}$; c) $v_c=150\text{m/min}$

The length of spacing belonging to the different adjusted parameters can be approximately calculated from the coordinates of the rectangular triangles, expressed in mm-s, being in Figure 5.

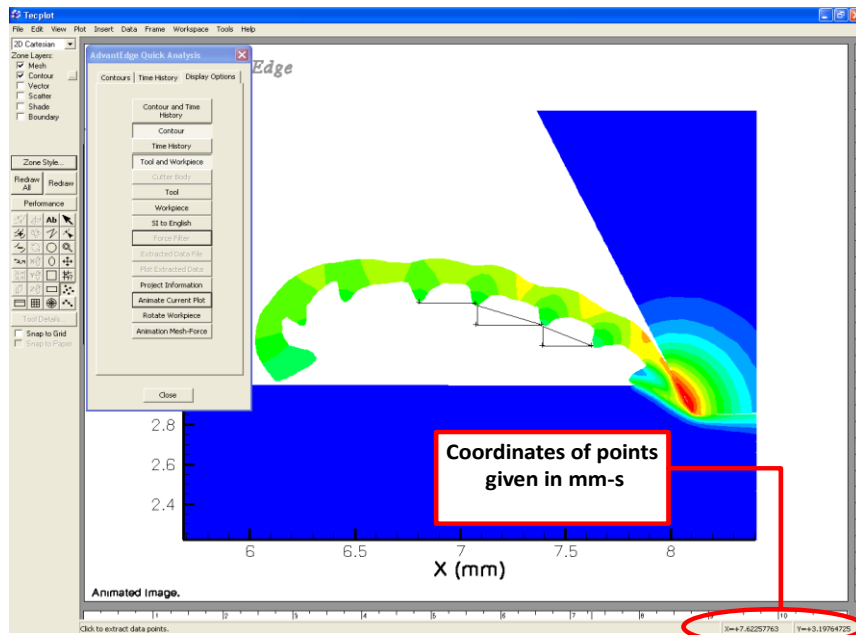


Figure 5 – Calculation of length of spacing between the originating „saw-teeth” of the developing chip

The connections between cutting speed and the spacing length of bulge originating from the shear can be seen in Figure 6.

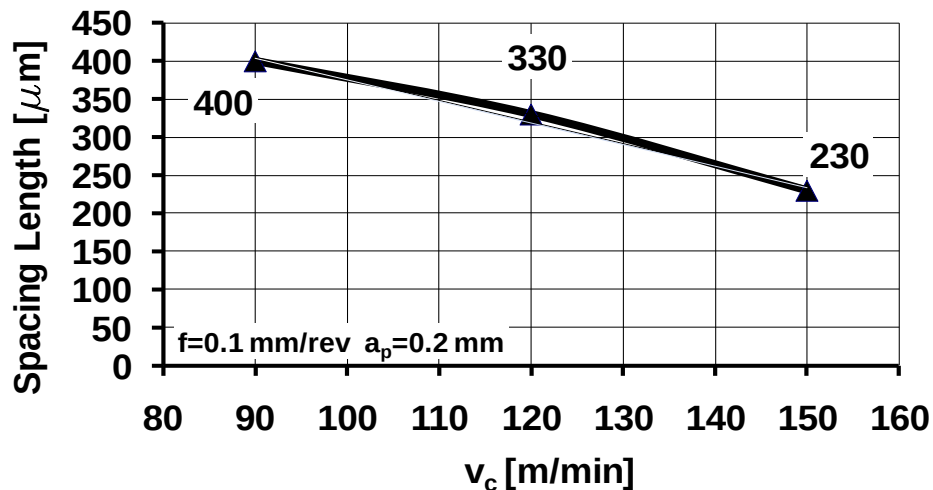


Figure 6 – Connection between chip bulge and cutting speed

The changing of shape of the chip having almost regular periodicity and the chip formation mechanism allow to conclude that cutting forces have to emerge with similar periodicity during chip removal (Figure 4). In this figure

the momentary values of cutting forces as the function of the constant value of feed, depth of cut and cutting speed are demonstrated.

SUMMARY

Some features of chip formation in hard turning were examined by the FEM simulation. The adiabatic chip formation can have a significant effect on the transformation of texture, so the formation of white layer as well. The research of these relations needs further examinations.

ACKNOWLEDGEMENT

The work was presented by the support of the Hungarian Scientific Research Fund (Number of Agreement: OTKA K 78482), which the authors greatly appreciate. This research was supported by the program TÁMOP 4.2.1.B-09/1/KONV.

References: 1. Pálmai, Z.: Fémek forgácsolhatósága. Műszaki könyvkiadó. Budapest, 1980. pp.61-69; 2..Al-Zkeri, I.: Finite Element Modelling of Hard Turning. VDM Verlag Dr. Müller. Saarbrücken, 2008. ISBN: 978-3-639-110340; 3. Davies M.A., Evans C.J., Chou, Y.: On Chip Morphology, Tool Wear and Cutting Mechanics in Finish Hard turning. Annals of the CIRP Vol. 45/1. 1996. pp.77-82; 4. Third Wave AdvantEdge™ User's Manual, Version 5.1; 5. Davim J.P., Maranhao C.: A study of plastic strain and plastic strain rate in machining steel AISI 1045 using FEM analysis Materials and Design 30. 2009. pp.160-163; 6. ČSN 41 4220/ISO 683/11-70; 7. Kundrák J., Bana V.: Model for cutting forces in hard turning of bores. Annals of DAAAM for 2004 & Proceedings of the 15th International DAAAM Symposium - Intelligent Manufacturing & Automation: Globalisation - Technology - Men – Nature, Vienna, Austria 2004. pp.241-242; 8. Recht R.F.: Catastrophic Thermoplastic Shear. Journal of Applied Mechanics. Vol. 31. pp.189-193; 9. Beňo J.: Teória rezania kovov. Vienaľa, Košice, 1999. pp.61-110 (ISBN 80-7099-429-0); 10. Maňková I., Beňo J.: Introduction to FEM Simulation of Cutting Temperature when Turning of AISI 1045 Steel. XXIII. MicroCAD International Scientific Conference 19-20 March 2009. pp.157-162 (ISBN 978-963-661-878-0); 11. Kundrák J., Zebala W., Bana V.: Examination of cutting zone deformation occurring in hard turning by FEM simulation. Manufacturing technology. Journal for Science, Research and Production Vol 3/2003, pp.3-7. (ISSN 1213-2489); 12. Mamalis AG; Kundrák J, Markopoulos A, et al.: On the finite element modelling of high speed hard turning International Journal of Advanced Manufacturing Technology Volume: 38 Issue: 5-6 pp.441-446 Published: aug 2008.

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

ОСОБЕННОСТИ АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ ПРИРОДНОГО КАМНЯ НА ТОКАРНЫХ СТАНКАХ

Досліджена можливість призначення раціональних технологічних параметрів шліфування природних каменів із застосуванням модернізованих токарних верстатів різних моделей та використання різноманітного алмазно-абразивного інструменту залежно від хімічного складу таких каменів, а саме вмісту в їх складі оксиду кремнію та основних міцнісних властивостей цих каменів: твердості і межі міцності при стисненні

Исследована возможность назначения рациональных технологических параметров шлифования природных камней с применением модернизированных токарных станков разных моделей и использования различного алмазно-абразивного инструмента в зависимости от химического состава таких камней, а именно содержания в их составе оксида кремния и основных прочностных свойств этих камней: твердости и предела прочности при сжатии

Possibility of appointment of rational technological parameters of grinding of natural stones with application of the modernised lathes of various models and uses of the various almazno-abrasive tool depending on a chemical compound of such stones, namely maintenances in their structure oxides silicon and the basic strong properties of these stones is investigated: hardness and strength at compression

Введение. Известно, что изготовление изделий из природного камня [1, 2] осуществляется преимущественно шлифованием с использованием алмазно-абразивного инструмента. При изготовлении изделий из природного камня простой геометрической формы, например, строительных (облицовочной и половой плитки, ступеней, фриз и т. д.) [1], как правило, применяют специализированные поточные линии [3]. В тоже время при изготовлении изделий из камня со сложной, пространственно развитой поверхностью (ступки, шары, часы, вазы и т. д.) [2] во многих случаях применяют модернизированное металлообрабатывающее оборудование в т. ч. токарные станки разных моделей [4, 5].

Известно также, что большая часть природных камней из добываемых в Украине (гранитов, лабрадоритов, габбро) [6] обрабатываются с использованием алмазно-абразивного инструмента [7].

Параметры обработки (шлифования) твердых и хрупких материалов (природного камня), алмазно-абразивным инструментом на различных технологических операциях существенно отличаются от параметров обработки пластичных материалов, например металлов и их сплавов.

Данная работа ставит своей целью разработку технологических параметров обработки резанием (чернового шлифования) природных камней с использованием алмазно-абразивного инструмента на токарных станках.

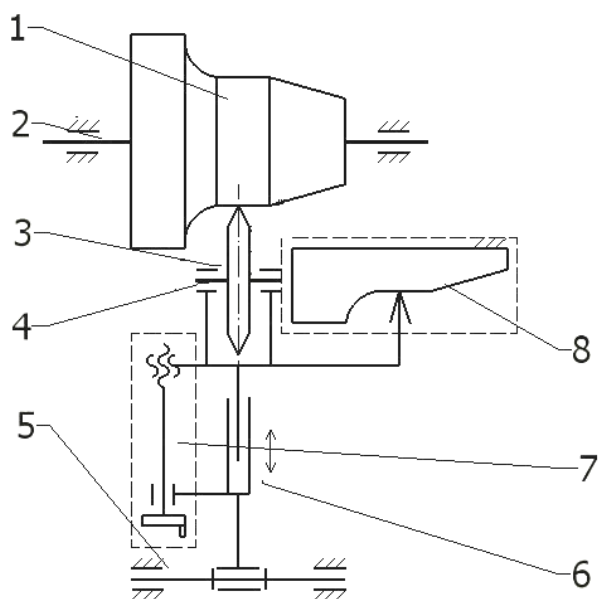
Методика исследований. Для шлифования природных камней при изготовлении изделий применяют различные виды токарных (токарно-винторезных) станков, которые осуществляют обработку (формообразование) изделий в соответствии со способом [8]. В табл. 1 приведены некоторые технические характеристики таких станков [4, 5].

Модернизация токарных станков при перепрофилировании их для обработки камня, состоит в оснащении их дополнительной автономной шлифовальной головкой с собственным приводом, которая устанавливается на суппорте токарного станка, механизмом копира, а также системой подачи и регенерации смазывающе-охлаждающей технологической среды (СОТС).

Таблица 1–Технические характеристики токарных станков применяемых для обработки камня

№ п/п	Параметры	1К62М	16Б04А	16Б05П
1	Наибольший диаметр обрабатываемых заготовок, мм над станиной над суппортом	400 200	200 115	250 145
2	Наибольший диаметр прутка, проходящего через шпиндель, мм	45	14	16
3	Частота вращения шпинделя, об./мин.	12,5-2000	320-3200	30-3000
4	Подача суппорта, мм/об. продольная поперечная	0,07-4,16 0,035-2,08	0,01-0,175 0,005-0,09	0,02-0,35 0,01-0,175
5	Мощность электродвигателя главного привода, КВт	10	1,1	1,5
6	Габаритные размеры, мм длина ширина высота	2812 1166 1324	1310 690 1360	1510 725 1360
7	Масса, кг	2200	1245	715

Принципиальная схема такой обработки представлена на рисунке.



1 – заготовка; 2 – ось шпинделя станка; 3 – плоский с двухсторонним профилем инструмент; 4 – подвижная шлифовальная головка; 5 – направляющая; 6 – ползун; 7 – винтовая пара; 8 – копир

Рисунок – Принципиальная схема обработки камня на токарных станках

При шлифовании камня на токарных станках используются следующие виды алмазного инструмента, характеристики которого, а также параметры его алмазоносного слоя, представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Рекомендуемый для токарной обработки камня алмазный инструмент и параметры его алмазоносного слоя

№ п/п	Рекомендуемые параметры инструмента	Параметры алмазоносного слоя
1	Круги с двусторонним коническим профилем 1ЕЕ1 (14ЕЕ1) $\varnothing 125-150 \times 30^0 \times 5 \times 32$	АС65-АС80 315/250-200/160 М2-01 (М6-14) 50-100
2	Круги прямого профиля 1А1 $\varnothing 150-350 \times 10-25 \times 3-5 \times 32-75$	АС32-АС80 315/250-200/160 М2-01 50-100
3	Круги полукруглого профиля 1Р1Х $\varnothing 125-150 \times 10-32 \times 3-5 \times 32$	АС32-АС50 315/250-250/200 М2-01 50-100
4	Коронки алмазные. АС 6 $\varnothing 50-100$	АС65-АС80 250/200 М2-01 50-100
5	Головки алмазные цилиндрические АГЦ $\varnothing 12-20$	АС32-АС50 315/250-200/160 М2-01 50-100
6	Сверла алмазные АС 1 $\varnothing 5-50$	АС32-АС50 250/200 М2-01 50-100

При шлифовании природного камня для образования наружных поверхностей тел вращения, в том числе сложных (конических, специальных – получаемых по копиру), используют инструмент с двусторонним коническим профилем (табл. 2, стр. 1). Для образования других поверхностей инструмент (табл. 2 стр. 2, 3), для расточки внутренних поверхностей используют инструмент (табл. 2 стр. 5), а для получения сферических поверхностей и выполнения отверстий используют алмазные коронки и сверла (табл. 2 стр. 4, 6).

Полученные результаты. Основные параметры процесса алмазного шлифования (производительность, трудоемкость, потребляемая мощность, и др.) существенно зависят от свойств обрабатываемых материалов [9], в первую очередь прочностных свойств природного камня, т. е. его способности в определенных условиях и пределах воспринимать, не разрушаясь, силовые воздействия [10]. К основным прочностным свойствам природных камней можно отнести твердость по шкале Мооса (T_M) и Викерсу (H), а также предел прочности при сжатии ($R_{сж}$) [11]. В зависимости от этих свойств природных камней и содержания в их составе определенных компонентов [12], все их многообразие можно условно разбить на 5 групп обрабатываемости так, как показано в табл. 3.

Таблица 3 – Обрабатываемость природных камней в зависимости от прочностных свойств и содержания в их составе оксида кремния

Прочностные свойства природного камня			Суммарное содержание SiO_2 , %	Группы обрабатываемости
T_M , отн. ед.	H , ГПа	$R_{сж}$, МПа		
До 4,0	До 4,5	До 150	До 20	1
			20-40	2
4,0-6,0	4,5-8,0	150-300	40-60	3
			60-80	4
Св.6,0	Св. 8,0	Св. 300	Св. 80	5

Производительность шлифования природных камней принадлежащих к разным группам при одинаковых технологических параметрах их обработки в соответствии со способом [13] существенно отличаются [14].

Основными регулируемыми параметрами, выбираемыми для камней разных видов, являются скорость вращения шпинделя станка, продольная и поперечная подачи (табл. 4). Приведенные данные получены в

результате обобщения и анализа опыта обработки различных видов природного камня при изготовлении различных изделий из него [2, 15-17].

Трудоемкость получения поверхностей вращения с применением токарных станков и использованием алмазного инструмента можно предварительно оценить с помощью норм оперативного времени ($НТ_{оп}$), зная площадь поверхности (геометрические размеры) обрабатываемой детали.

Таблица 4 – Рекомендуемые технологические параметры шлифования природных камней на токарных станках

№ п/п	Технологические режимы:	Рекомендуемые значения
1	Наружное черновое шлифование	
1.1	Число оборотов шпинделя шлифовальной головки, об./мин.	1450-1750
1.2	Число оборотов шпинделя станка при шлифовании деталей размером до Ø150, об./мин. камни 1 и 2 групп обрабатываемости камни 3 и 4 групп обрабатываемости камни 5 группы обрабатываемости	40-60 16-40 12,5-16
1.3	Продольная подача, мм/об.: камни 1 и 2 групп обрабатываемости камни 3 и 4 групп обрабатываемости камни 5 группы обрабатываемости	0,10-0,13 0,07-0,10 0,03-0,07
1.4	Поперечная подача, мм/об.: камни 1 и 2 групп обрабатываемости камни 3 и 4 групп обрабатываемости камни 5 группы обрабатываемости	0,050-0,065 0,035-0,050 0,015-0,035
2	Внутреннее черновое и чистовое шлифование	
2.1	Число оборотов шпинделя шлифовальной головки, об./мин.	1450-1750
2.2	Число оборотов шпинделя станка для всех групп камней, об./мин.	12,5-40
2.3	Продольная подача для всех групп камней, мм/об.	0,07-0,10
2.4	Поперечная подача для всех групп камней, мм/об.	0,035-0,05

В табл. 5 в качестве примера, приведены нормы оперативного времени шлифования камней 1-й группы обрабатываемости на токарных станках, которые применяются в производственных условиях НТАК «Алкон» для расчета трудоемкости изготовления деталей из камня, полученные путем проведения хронометража.

Таблица 5 – Основное технологическое (оперативное) время обработки для камней 1-й группы обрабатываемости на токарных станках (1К62М)

№ п/п	Наименование операции	Размер обрабатываемых деталей	Норма времени НТ _{оп} , мин./дм ²
1	Черновая обработка цилиндрических поверхностей	Ø до 150 мм Ø до 300 мм	40-50 10-20
2	Черновая обработка сложных поверхностей по копиру	Ø до 300 мм	80-86

Выводы. В результате проведенных исследований показана возможность обработки резанием (чернового шлифования) и формообразования шлифованием изделий из природных камней на токарных станках с использованием алмазного инструмента. Установлены рациональные технологические режимы чернового шлифования и формообразования изделий из природного камня на токарных станках в зависимости прочностных свойств камней и особенностей их химического состава.

Список литературы: 1. ДСТУ Б В.2.7-37-95. Строительные материалы. Плиты и изделия из природного камня. Технические условия. 2. Изделия камнерезные ТУ У 26.7. – 23504418 – 001: 2007. 3. В. Хиониевський. Обробка каменю частина 11. Камнеобробні лінії. // Камінь. – Київ. Сківак-прес, 2009. – № 2. (28), – С 24-27. 4. Данилевский В. В. Справочник техника машиностроителя. – М.; Высшая школа 1962. – 646 с. 5. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 томах. Т. 2 / Под ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова. – М.: Машиностроение. – 1985. – 496 с. 6. Гелета О. Л. Огляд експортно-імпортних операцій з декоративним камінням України у 2007 році. // Коштовне та декоративне каміння. Інформаційно-довідкове видання. – Київ: Вид. ДГЦ МФУ, – 2008. – 2. № 52, С 3 – 11. 7. Сычев Ю. И., Берлин Ю. Я. Шлифовально-полировальные и фрезерные работы по камню. – М.: Стройиздат, 1985. – 312 с. 8. Пат. 28151 Украина, МПК (2006). В28D 1/00, В23В 1/00, Способ обработки поверхностей вращения / В. И. Сидорко, В. В. Пегловський, В. Н. Ляхов, Е. М. Поталыко. – Заявл. 26.07.07; Оpubл. 26.11.07, Бюл. № 19. 9. Маслов Е.Н. Теория шлифования материалов. – М. Машиностроение, 1974. – 318с. 10. Г.Д. Лидин, Л.Д. Воронина, Д.Р.Каплунов. Горное дело. Терминологический словарь. – М. Недра. 1990. – 694 с. 11. ГОСТ 30629-99. Материалы и изделия облицовочные из горных пород. Методы испытаний. Введ. 01.01.2001. 12. Исследование влияния компонентов химического состава природных камней на их прочностные свойства и производительность шлифования / В. И. Сидорко, В. В. Пегловський, В. Н. Ляхов, Е. М. Поталыко // Резание и инструмент в технологических системах. – МНТС Вып. 75. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2008. – С 356-361. 13. Пат. 33227 Україна, МПК (2006). В28D 1/00, Спосіб визначення оброблюваності каменю / В. І. Сидорко, В. В. Пегловський, В. Н. Ляхов, О. М. Поталыко. – Заявл. 21.02.08; Оpubл. 10.06.08, Бюл. № 11. 14. Исследование производительности и трудоемкости шлифования природных камней алмазным инструментом / В. В. Пегловський, В. И. Сидорко, В. Н. Ляхов, Е. М. Поталыко // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технологии его изготовления и применения. – Вып. 12. – Киев: ИСМ им. В.Н. Бакуля. – 2009. – С 500-504. 15. Пат. 15655 Украина, МКПО 10 – 01. Часы / В. И. Сидорко, В. Н. Ляхов, В. В. Пегловський, Е. М. Поталыко. – Заявл. 25.06.07; Оpubл. 10.01.08, Бюл. № 1. 16. Пат. 15656 Украина, МКПО 10 – 01. Набор письменный «Сектор» / В. И. Сидорко, В. Н. Ляхов, В. В. Пегловський, Е. М. Поталыко. – Заявл. 25.06.07; Оpubл. 10.01.08, Бюл. № 1. 17. Пат. 16754 Украина, МКПО 10 – 01. Подсвечник / В. И. Сидорко, В. Н. Ляхов, В. В. Пегловський, Е. М. Поталыко. – Заявл. 13.09.07; Оpubл. 10.06.08, Бюл. № 11.

В.М. ТОНКОНОГИЙ, д-р техн. наук,
Л.М. ПЕРПЕРИ, канд. техн. наук,
Л.В. БОВНЕГРА, канд. техн. наук,
А.М. ГОЛОБОРОДЬКО, Одесса, Украина

ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ РАБОЧИХ ЭЛЕМЕНТОВ АБРАЗИВНО-ВЫГЛАЖИВАЮЩИХ РАЗВЕРТОК С УЧЕТОМ УСЛОВИЙ ОБРАБОТКИ

У статті розглянуті основні умови та надано рекомендації щодо вибору раціональних матеріалів робочих елементів абразивно-вигладжувальних розгортки. Проведено експериментальні дослідження з визначення впливу зернистості абразивних елементів на середні значення шорсткості поверхні отворів.

В статье рассмотрены основные условия и даны рекомендации по выбору рациональных материалов рабочих элементов абразивно-выглаживающих разверток. Проведены экспериментальные исследования по определению влияния зернистости абразивных элементов на средние значения шероховатости поверхности отверстий.

In article the basic conditions are considered and recommendations for choice rational materials of working elements abrazivno-burnishing reamers are made. Experimental researches by definition of influence of granularity of abrasive elements on average values of a roughness of a surface of apertures are spent.

Требования, предъявляемые к точности размера, формы и расположения точных координированных отверстий (IT 5 – 6), а также к качеству поверхностного слоя приводят к совершенствованию технологических методов механической обработки. Качество поверхности является одним из наиболее важных факторов и обусловлено свойствами материалов и методом механической обработки. В этих условиях актуальным является вопрос, касающийся определения влияния зернистости рабочих элементов абразивно-выглаживающих разверток на шероховатость поверхности.

Цель работы – определение рациональных характеристик материалов рабочих элементов для конкретных условий обработки абразивно-выглаживающими развертками (АВР).

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

- рассмотреть условия обработки;
- определить материалы рабочих элементов и их параметры.

Условия обработки определяются материалом заготовки, ее твердостью, а также диаметром отверстия и припуском на абразивное развертывание. Скорость вращения АВР при размерной обработке назначалась из числа рекомендуемых значений для процессов хонингования и абразивного развертывания [1].

Определение рациональных материалов рабочих элементов для конкретных условий абразивно-выглаживающего развертывания осуществлялось на основе размаха и средних значений шероховатости поверхности после размерной и отделочной обработки АВР представленной на рис.1. Геометрия АВР – углы разворота между абразивным элементом (АЭ) 5 и направляющими элементами 6, 3, 4 соответственно $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$: $\varphi_1 = 80^\circ - 90^\circ$, $\varphi_2 = 180^\circ$, $\varphi_3 = 270^\circ$. Для обеспечения возможности съема припуска большей величины на наружную поверхность поворотного блока наносят гальванопокрытие [2]. Отношения суммарной длины дуг абразивных элементов к длине окружности обрабатываемого отверстия находились в диапазонах $q = 0,10 - 0,15$ и $q = 0,15 - 0,20$ для АВР с АЭ и АВР с абразивной вставкой с нанесенным гальванопокрытием (АВГП) соответственно. Длины рабочих элементов находились в диапазоне 0,25 – 0,8 длины обрабатываемых отверстий (19 – 150 мм). Материал заготовок – сталь 20Х с HB ≤ 216 и HRC 32 – 36; сталь ШХ15 с HRC 18 – 22 и HRC 58 – 62; сталь 65Г с HRC 48 – 54. Исследования проводились на многоцелевом станке модели 2254BM1Ф4. Шероховатость поверхности отверстий заготовок находилась в диапазоне Ra = 0,32 – 1,25 мкм и обеспечивалась на операции растачивания твердосплавными резцами и резцами из эльбора [3]. В качестве СОТС использовалась 30% водная эмульсия.

В качестве абразивных материалов использовались гексанитовые порошки марки СГАД, кубонит марки КР и алмазные порошки марки АС6, АС32, АСВ зернистостью от 63/50 до 200/160. Предварительный выбор материалов рабочих элементов АВР осуществлялся с учетом обрабатываемых материалов, их твердости, а также условий абразивно-выглаживающего развертывания.

Влияние зернистости абразивных элементов АВР на средние значения шероховатости поверхности отверстий после размерного этапа – *a* и отделочного этапа – *б* обработки показаны на рис. 2.

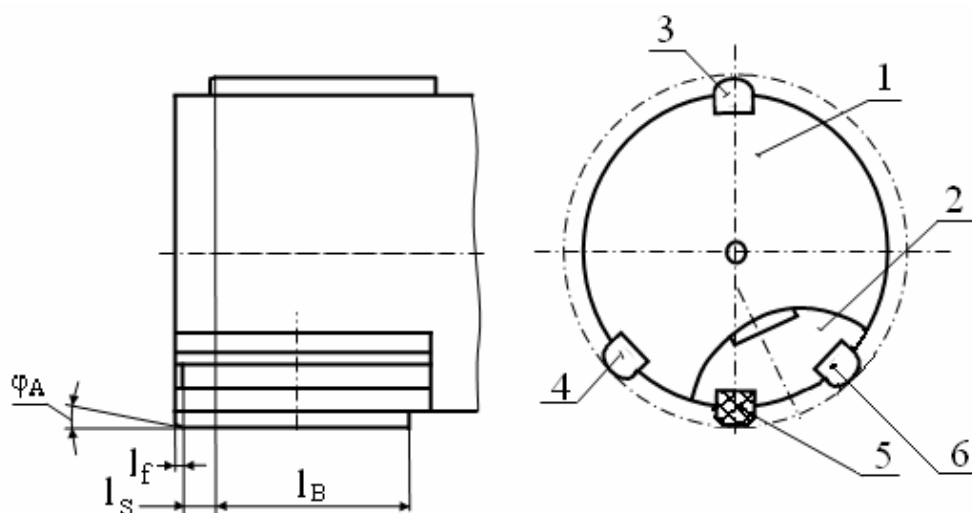


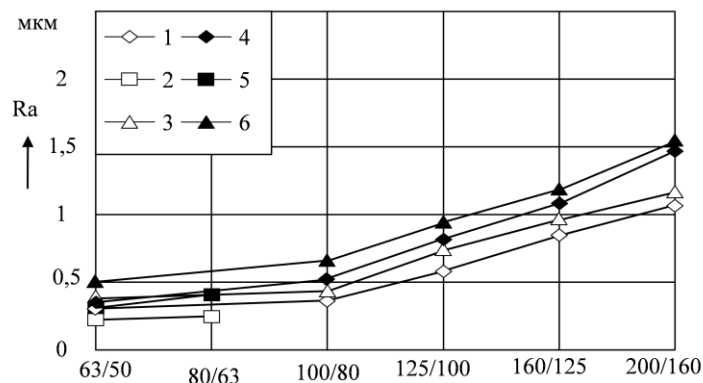
Рисунок 1 – Схема АВР: 1 – корпус АВР, 2 – поворотный блок, 3, 4 и 6 – направляющие элементы, 5 – абразивный элемент; l_f – длиной заходной фаски абразивного элемента, φ_A – угол наклона в плане заходной фаски, l_s – осевое смещение вершины абразивного элемента относительно вершины направляющего элемента, l_B – длина основной рабочей поверхности абразивного элемента.

В результате исследований установлено следующее:

1. При обработке отверстий с припуском 10 мкм в термообработанных стальных заготовках (стали марок ШХ15, 65Г, 20Х с HRC 32 – 36) целесообразно использовать в качестве материала абразивных элементов АЭ-СГАД или АВГП-СГАД зернистостью 100/80 и направляющие элементы из поликристаллических алмазов.

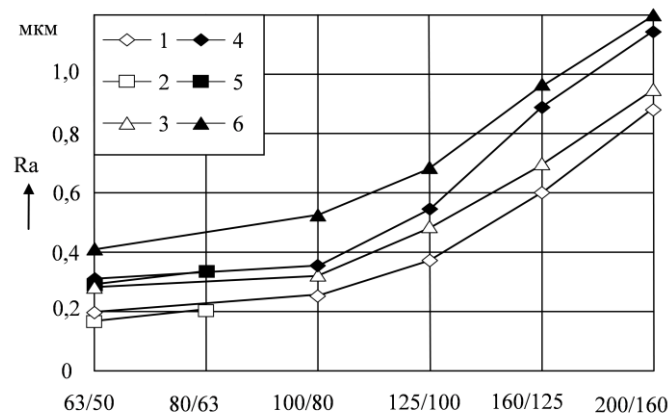
2. Если припуск не больше 8 мкм, наилучшие результаты получены при использовании рабочих элементов АЭ-КР или АВГП-КР с зернистостью 80/63, а также направляющих элементов из поликристаллических алмазов. Несколько худшие результаты получены в случаях применения АВГП-СГАД.

3. Использование направляющих элементов из синтетических алмазов марок АС зернистостью 14/10 с концентрацией 200 % приводит к налипанию мелкой стружки на их рабочих поверхностях при отделочной обработке в случаях, если окружная скорость разворачивания V_o превышает 0,5 м/с. В результате увеличивается шероховатость обработанной поверхности, снижается эффективность последующей размерной обработки, а, в отдельных случаях, последующую размерную обработку вообще невозможно осуществить.



зернистость

а)



зернистость

б)

Рисунок 2 – Влияние зернистости абразивных элементов АВР на средние значения шероховатости поверхности отверстий после размерного этапа – а и отделочного этапа – б обработки: 1 – АЭ-СГАД, 2 – АЭ-КР, 3 – АВГП-СГАД; сталь ШХ15, HRC 58 – 62; $d = 75$ мм, $l = 120$ мм; 4 – АЭ-СГАД, 5 – АЭ-КР, 6 – АВГП-СГАД; сталь 20Х, HRC 32 – 36; $d = 40$ мм, $l = 70$ мм; $Z \leq 15$ мкм, $VP = 0,15$ м/с, $SP = 1,2$ мм/об; $VO = 0,6$ м/с, $SO = 0,5$ мм/об.

4. Установлено, что чем выше зернистость АЭ и АВГП, тем выше возможная скорость отделочной обработки, так как с увеличением зернистости «засаливание» режущей поверхности при отделочной обработке легче удаляется в начале последующей размерной обработки. Поэтому АЭ-КР или АВГП-КР с зернистостью 63/50 менее эффективен, чем с зернистостью 80/63, так как в последнем случае при наличии направляющих элементов из поликристаллических алмазов возможна отделочная обработка с более высокой скоростью. Например, при обработке термообработанных стальных заготовок (стали марок ШХ15, 65Г, 20Х с HRC 32 – 36) рациональная окружная скорость отделочной обработки находится в диапазоне $VO = 0,5 - 1,2$ м/с (меньшее значение скорости отделочной обработки соответствует большему диаметру

развертываемого отверстия), а при обработке стали 20Х с $HV \leq 216$ – находится в диапазоне $V_0 = 0,5 - 1,0$ м/с.

5. Установлено, что окружная скорость размерной обработки АВР почти в два раза меньше, чем рекомендуемые значения для операции хонингования. Это связано с применением меньших скоростей продольного перемещения при абразивно-выглаживающем развертывании. Например, при обработке стальных заготовок (стали марок ШХ15, 65Г, 20Х с HRC 32 – 36) рациональная окружная скорость размерной обработки находится в диапазоне $V_P = 0,2 - 0,35$ м/с (меньшее значение скорости отделочной обработки соответствует меньшему диаметру развертываемого отверстия), а при обработке стали 20Х с $HV \leq 216$ – находится в диапазоне $V_P = 0,1 - 0,25$ м/с.

6. Выявлено, что при обработке отверстий диаметрами более 50 мм и припуском до 8 мкм более эффективно применение АВР с АВГП-С или АВГП-К, так как в этом случае параметр q выше и поломки рабочих элементов во время входа инструмента в обрабатываемое отверстие практически исключаются. Диапазон рекомендуемых скоростей отделочной обработки при использовании вставок АВГП-С или АВГП-К аналогичен указанным в предыдущем пункте значениям.

7. При обработке отверстий диаметрами 15 – 150 мм в стальных заготовках с припуском в пределах не более 20 мкм целесообразно использовать АВГП-СГАД с зернистостью 200/160, 160/125, 125/100. Причем чем больше припуск, тем большую зернистость необходимо назначать из предложенного диапазона. Для получения в термообработанных стальных заготовках (сталь марок ШХ15, 65Г, 20Х с HRC 32 – 36) шероховатости поверхности отверстий менее $Ra \leq 1$ мкм необходимо назначать припуск на обработку 15 мкм и использовать АВГП-СГАД с зернистостью не более 125/100. Наиболее эффективна размерная обработка отверстий АВГП-СГАД с зернистостью 200/160, в том числе, и стали 20Х с $HV \leq 216$, но для получения шероховатости поверхности в пределах $Ra = 0,32 - 0,63$ мкм после отделочной обработки необходимо выполнять ее АВГП-КР с зернистостью 80/63. Однако наименьший размах шероховатости поверхности отверстий, гарантированное исключение «засаливания» рабочей поверхности обеспечивается на отделочном этапе с окружными скоростями $V_0 = 0,7 - 1,2$ м/с ($Ra = 0,10 - 0,32$ мкм, материал заготовок – сталь ШХ15, HRC 58 – 62).

Список литературы: 1. Абразивная и алмазная обработка материалов: Справочник / Под общ. ред. А.Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1977. – 390 с. 2. Перпери Л.М. Теоретическое обоснование окончания размерной абразивно-выглаживающей обработки ступенчатых отверстий / Перпери Л.М., Тонконогий В.М., Джугурян Т.Г. // Високі технології в машинобудуванні: НТУ “ХПІ”. – 2008. – Вип. 1 (16). – С.227 – 236. 3. Кирсанов С.В. Инструменты для обработки точных отверстий / [Кирсанов С.В., Гречишников В.А., Схиртладзе А.Г., Кокарев В.И.]. – М.: Машиностроение, 2003. – 330 с.

ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ

УДК 621.365.

Б. М. АРПЕНТЬЕВ, д-р техн. наук,
Н. К. РЕЗНИЧЕНКО, д-р техн. наук,
Н. Л. ШЕЛКУНОВА, Харьков, Україна

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНОЙ ВЕЛИЧИНЫ СБОРОЧНОГО ЗАЗОРА И ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕВА В ПРОЦЕССЕ ТЕПЛОВОЙ СБОРКИ ДЕТАЛЕЙ

У статті приведені результати визначення величини складальних зазорів і температури деталей в процесі виконання технологічних операцій. Експериментально встановлені додаткові коефіцієнти зміни умов складання залежно від зміни частоти поверхні вживання мастила, що враховують, а так само штучного охолодження деталі в процесі збірки. Відмічена роль Г.Я. Андрєєва і Б.М. Арпентьєва в створенні наукових основ теплового складання.

В статье приведены результаты определения величины сборочных зазоров и температуры деталей в процессе выполнения технологических операций. Экспериментально установлены дополнительные коэффициенты учитывающие изменения условий сборки в зависимости от изменения частоты поверхности применения смазки, а так же искусственного охлаждения детали в процессе сборки. Отмечена роль Г.Я. Андреева и Б.М. Арпентьева в создании научных основ тепловой сборки.

In the article the results of determination of size of frame-clamping gaps and temperature of details are resulted in the process of implementation of technological operations. Additional coefficients are experimentally set taking into account changes of terms of assembling depending on the change of frequency of surface of application of greasing, and similarly artificial cooling of detail in the process of assembling. The role of G.Ya is marked. Andreeva and B.M. Arpent'eva in creation of scientific bases of the thermal assembling.

Введение. Наиболее распространенным методом сборки соединений с натягом по цилиндрическим поверхностям, которые занимают большое место среди всех остальных видов сопряжений, является метод запрессовки.

Он имеет целый ряд недостатков, главным из которых – отсутствие взаимозаменяемости собираемых деталей и нестабильность технологического процесса из-за высокого процента исправимого и неисправимого брака, который является основной причиной, препятствующей созданию производительного сборочного оборудования.

При сборке деталей тепловым методом (с нагревом охватывающей детали) сопрягаемые поверхности не нарушаются и обеспечивается прочность соединения в два-три раза превышая прочность, получаемую при запрессовке.

Кроме того, тепловой метод позволяет перевести сборку соединений с гарантированным натягом в область сборки с гарантированным зазором, что дает возможность осуществлять соединение деталей простым методом на основе взаимозаменяемости, без применения дорогостоящего прессового оборудования [1,2].

Среди работ, посвященных сборке соединений с натягом при использовании метода теплового воздействия, следует отметить основополагающие исследования профессора Андреева Г.Я., как в области прочности тепловых сопряжений, так и в создании индукционно – нагревательных устройств и сборочного оборудования. [4]

Постановка задачи. В зависимости от условий сборки и параметров собираемых деталей определить минимально допустимую величину теплового зазора и температуру нагрева охватывающей детали.

Изложение основного материала. Характерной особенностью технологического процесса сборки с использованием теплового воздействия является его сложная структура, связанная с необходимостью манипулирования с горячей деталью. При этом выполнение соответствующих операций сопровождается специфическими требованиями: максимальными сокращениями потерь тепловой энергии от теплоотдачи в окружающую среду и механизмами сборочного устройства.

Остывание детали в течение цикла сборки может привести к уменьшению сборочного зазора ниже допустимой величины, в результате чего сборка или совсем не осуществится, или будет идти с повреждением посадочных поверхностей, а также произойдет преждевременное скрепление деталей. Перегрев деталей перед началом сборочного цикла, обеспечивающий наличие большого сборочного зазора, в большинстве случаев недопустим из-за возможных изменений физико-механических свойств материала и, кроме того, он не выгоден экономически.

Длительность цикла и, следовательно, производительность сборочного станка, как правило, определяются длительностью операции нагрева охватывающей детали (если нагреватель встроен в кинематическую схему станка) и операции скрепления.

При технологическом процессе с частичным совмещением цикловых операций, когда группа операций с охватываемой деталью совмещается с

группой операций выполняемой с охватывающей деталью, необходимым условием является соблюдение зависимости:

$$\sum \tau_n > \sum \tau_x, \quad (1)$$

где $\sum \tau_n$ - сумма времени, идущего на выполнение операций с нагретой охватывающей деталью; $\sum \tau_x$ - сумма времени, идущего на выполнение операций с охватываемой деталью.

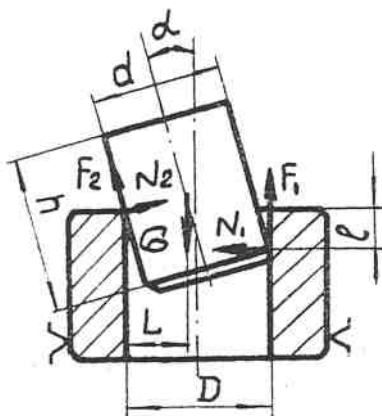


Рисунок 1 – Схема вертикальной сборки вала с втулкой

В этом случае мы избегаем потерь тепла, которые могли бы произойти в результате ожидания нагретой деталью сборочной операции.

Свободное соединение деталей при тепловом методе обеспечивается наличием теплового сборочного зазора. Его величине определяется условиями обеспечения собираемости узла на данной сборочной машине. Однако сборочный зазор (i) не может быть больше некоторого $i_{\max}$ и меньше $i_{\min}$.

$$\left. \begin{aligned} i_{\min, c} &\leq i \leq i_{\max, c} \\ i_{\min, T} &\leq i \leq i_{\max, T} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Максимально возможный сборочный зазор равен

$$i_{\min} = \Delta D_{\max} - \delta_{\max} - \Delta D_o \quad (3)$$

где $\Delta D_{\max}$ - начальное тепловое расширение посадочного отверстия, получаемое при нагреве детали до максимально допустимой температуры; $\delta_{\max}$ - максимальный натяг в соединении; ΔD_o - величина уменьшения начального теплового расширения в результате остывания втулки.

Величина $i_{\min, c}$ определяется из силового расчета при заклинивании цилиндрических деталей.

Заклинивание может произойти как при вертикальной сборке вала с втулкой (рис.1), так и при горизонтальной, если вал вставляется во втулку, или втулка насаживается на вал. Рассмотрим сборку по схеме (рис. 1), осуществляемую под действием веса вала (G).

Условия незаклинивания:

$$GL \geq F_1 D - N_1 l.$$

Решая задачу равновесия вала, находим зависимость для определения $i_{\min, c}$.

$$i_{\min, c} \geq \sin^2 \alpha \cos \alpha \left[\frac{d}{2} (1 - f^2) + hf \right] + \frac{h}{2} \sin^3 \alpha (1 - f^2) - d (1 - \cos \alpha), \quad (4)$$

где f - коэффициент трения.

Зазор $i_{\min, T}$ зависит от скорости охлаждения охватываемой детали в процессе ее сборки с охватываемой деталью. Он может быть найден путем исследования физической стороны процесса теплового скрепления деталей в узел[3].

Для расчета $i_{\min, T}$ при условии "несхватывания" деталей в течение процесса их соединения (3-5 сек), используя подстановку

$$\Delta T = \frac{1}{\alpha_{em} D} (\delta_{\max} + i),$$

получаем формулу из зависимости:

$$\tau_{cx} = \frac{1}{aSA} \ln \frac{\Delta T}{\Delta T - \frac{A}{B} i} \quad (5)$$

где, S - площадь посадочной поверхности, через которую втулка передает тепло валу; C_{em} и C_e - удельная теплоемкость втулки и вала соответственно; α_{em} и α_e - коэффициенты линейного расширения материалов втулки и вала соответственно; T_{em} и T_e - температура втулки и вала соответственно; m_{em} - масса втулки; m_e - масса вала, находящаяся под посадочной поверхностью; a - коэффициент теплообмена между втулкой и валом.

Тогда,

$$i_{\min, T} = \delta_{\max} \frac{B(e^{aSA\tau} - 1)}{\alpha_{em} D A e^{aSA\tau}}, \quad (6)$$

Здесь $a = 180-200 \frac{\text{ккал}}{\text{мм}^2 \text{сек}^0 \text{С}}$.

По значению $i_{\min, T}$ определяется допустимая температура, которую должна иметь втулка перед соединением с валом.

Для проверки принятых схем расчета и уточнения полученных зависимостей экспериментально исследовались температурные поля и деформации вала и втулки в процессе их нагрева и охлаждения.

Основная часть экспериментов была выполнена на гладких цилиндрических втулках с посадочным диаметром 100 мм, длиной 100 мм, толщиной стенки 10, 20, 30 и 40 мм и валами длиной 300 мм. Материал валов ст.5, втулок – ст.20, чугун СЧ 18-36, бронза Бр0ЦС 5-5-5 и алюминиевый сплав АМг6Т. Кроме того, эксперименты проводились на соединениях с посадочным диаметром 50, 75 и 200 мм и с фасонными охватываемыми деталями. Температуры измеряли с помощью хромель – копелевых термопар 0,5 мм, установленных в сверлениях валов и втулок и приваренных конденсаторной сваркой. В качестве регистрирующих приборов использовались самопишущие электронные потенциометры ЭПП-09. Размеры деталей измеряли механическими приборами с точностью 2 микрон.

Результаты экспериментов свидетельствуют о правильности принятых схем расчета $\tau_{сх}$, a .

Экспериментально подтверждены теоретические зависимости (5,6) и получены коэффициенты, учитывающие изменение условий сборки.

Так, наличие неравномерного температурного поля в охватываемых деталях, имеющих диск, учитывается коэффициентом R_n . Деталь, имеющая ступицу, более прогретую, чем диск, скрепляется с валом быстрее, чем деталь с равномерным температурным полем, так как тепло из ступицы отводится не только в вал, но и в диск. В зависимости от неравномерности прогрева детали значение R_n меняется от 0,95 до 0,85.

Увеличение чистоты посадочных поверхностей и отсутствие смазки на валу приводит к удлинению процесса скрепления. Поправочный коэффициент $R_q = 1,1$ вводится при повышенной шероховатости поверхности деталей ($R_a = 0,63$, $R_a = 0,32$).

Отсутствие смазки вала учитывается коэффициентом $R_{нс}$. Для сборочных зазоров до 0,0015D $R_{нс} = 1,2$, для зазоров свыше 0,0015 D $R_{нс} = 1,05$.

Таким образом, формула (5) приобретает вид

$$\tau_{cx} = \frac{R_n R_q R_{nc}}{aSA} \ln \frac{\Delta T}{\Delta T - \frac{A_i}{B}} \quad (7)$$

Для определения эффективности искусственного охлаждения деталей при скреплении их в узел были проведены экспериментальные исследования, во время которых производилось охлаждение воздухом, а также водным раствором нитрита натрия, по данным некоторых авторов, является хорошим замедлителем коррозии, поэтому он и был выбран для исследований.

В серии опытов с охлаждением воздухом обдув горячей детали производился через трубку сечением 1,5 см² при давлении 2,5 атм. Охлаждение водным раствором нитрита натрия осуществлялось с помощью дождевальной установки.

Как показали исследования, охлаждение воздухом приводит к ускорению процесса скрепления на 20-25%, а омывание водным раствором ускоряет его в несколько раз.

Однако повышение расхода охлаждающей жидкости оправдывает себя до определенного предела, после которого τ_{cx} существенно не уменьшается.

Выводы.

Предложен метод расчета теплового сборочного зазора, позволивший определить его минимально допустимую величину в зависимости от условий сборки и параметров собираемых деталей.

По величине зазора рассчитывается температура нагрева охлаждаемой детали.

Определено влияние естественного и искусственного охлаждения на время протекания процесса скрепления деталей в узлы.

Список литературы: 1. Арпентьев Б.М. Исследование тепловой сборки деталей с гарантированным зазором. – Воронежский политехнический институт. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. 1969, 185 с. 2. Резниченко Н.К. «Якість та енергозбереження в процесах складання та розбирання з'єднань індукційним нагрівом: Монографія. Горлівка: «Видавництво Ліхтар». 2009.-180с. 3. Арпентьев Б.М. Определение теплового зазора при автоматической сборке соединений с натягом. Киев: Технология и организация производства, №3/1968.-с.15-21. 4. Андреев А.Г., Резниченко Н.К. Напряженно-деформированное состояние составных осесимметричных конструкций, собираемых с натягом при использовании нагрева. // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". – Харків: НТУ «ХПІ». -2005.-№47. -С. 3-8.

В. А. БОРОДИНОВ, канд. техн. наук,
Н. В. КОЗАКОВА, канд. техн. наук,
А. Я. МОВШОВИЧ, д-р техн. наук, Харьков, Украина

ТЕХНОЛОГИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ И МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЯ «РОЛИКОВАЯ ОПОРА КАЧЕНИЯ»

У статті наведено особливості технології виготовлення опори котіння з використанням високоточного обладнання з ЧПУ, з максимальною концентрацією операцій, застосуванням беззалишкової та малозалишкової технологій виготовлення заготовок і сучасних засобів метрологічного контролю.

В статье приведены особенности технологии изготовления опор качения с использованием высокоточного оборудования с ЧПУ, с максимальной концентрацией операций, применением безотходной и малоотходной технологий получения заготовок и современных средств метрологического контроля.

In the article the special features of the technology of manufacturing of rolling contact bearing with employment of high-accuracy equipment with numerical program supply, with greatest concentration of operations, with application without waste and low-waste technologies of manufacturing of blanks and the modern means of metrological control are resulted.

Состояние вопроса

Роликовые опоры качения предназначены для применения в направляющих качения различного металлообрабатывающего оборудования. Опоры воспринимают высокие нагрузки, действующие перпендикулярно плоскости перемещения исполнительных органов оборудования, и позволяют перемещать их с неограниченной величиной хода.

Состав опоры. Опора состоит из корпуса, двух головок, двух планок, двух стирателей, роликов (их количество зависит от габаритных размеров опоры), четырех винтов М4, двух вкладышей.

Конструктивно роликовая опора качения представляет собой плоский подшипник качения с замкнутой беговой дорожкой для роликов, расположенной в вертикальной плоскости (см. рисунок).

Материал корпуса и роликов – сталь ШХ15ГС (ГОСТ 801-78), головок и вкладышей – сплав ЦАМ4-1 (ГОСТ 19424-74), планок – лента 65Г-ВШ-С-НЗ-0,6/0,4×38 (ГОСТ 2893-79), стирателей – антифрикционный полиуретан.

К деталям опоры, особенно к корпусу и роликам, предъявляются жесткие требования по твердости, точности, расположению и шероховатости поверхностей: твердость корпуса и роликов 59–64 HRC₃; допуск изготовления диаметра ролика - 0,001 мм, корпуса 0,005 мм; допуск плоскостности дна продольного паза 0,001 мм; боковых сторон корпуса 0,002 мм; допуск параллельности боковых сторон корпуса 0,005 мм; допуск перпендикулярности боковых сторон корпуса относительно базы 0,005 мм; допуск цилиндричности и круглости диаметра ролика 0,0005 мм; шероховатость поверхности продольного паза корпуса 0,05 мкм, торцов ролика 0,05 мкм; диаметр ролика 0,1.

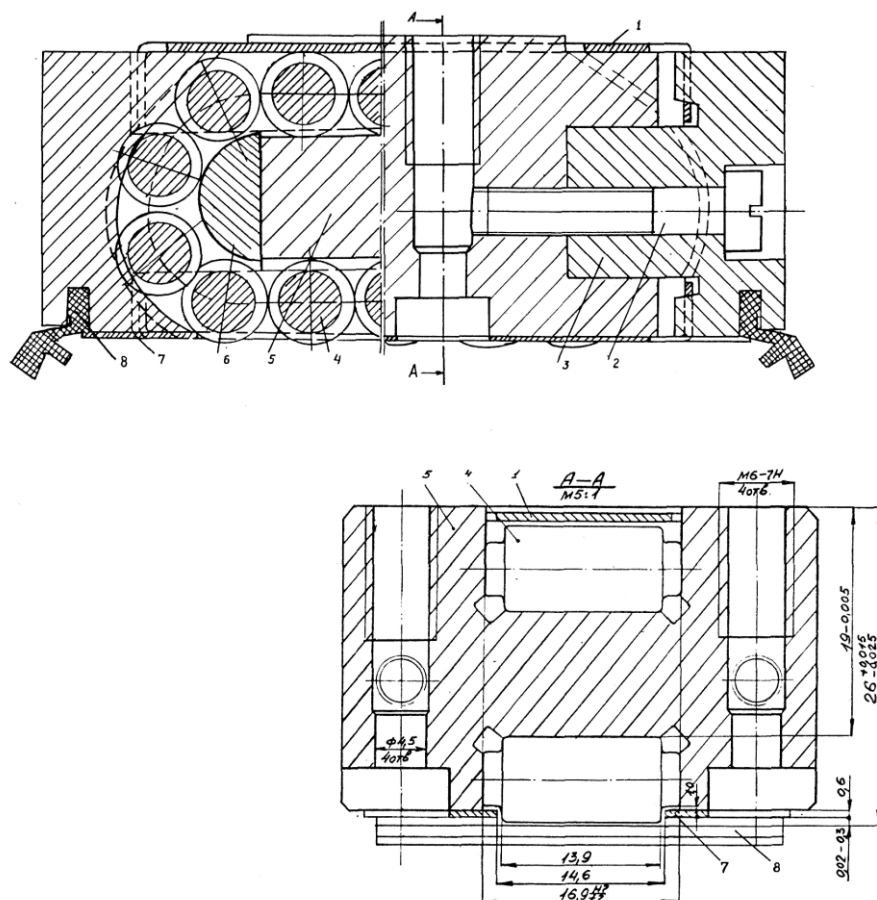


Рисунок – Роликовая опора качения: 1, 7 – верхняя и нижняя планки; 2 – винт; 3 – головка; 4 – ролик; 5 – корпус; 6 – вкладыш; 8 – стиратель

Производство роликовых опор качения представляет собой сложный и трудоемкий технологический процесс в связи с жесткими техническими условиями, предъявляемыми к изделию и его составным частям.

Действующая технология. Получение заготовок корпусов. Прокат круглого сечения Ø 50–80 мм предварительно разрезают на заготовки

длиной 500–600 мм на пилоотрезном станке мод. 8Г642. Заготовки нагревают в газопламенной печи с последующим протягиванием вручную на полосы определенной длины и сечения с разрубкой на мерные заготовки под штамповку.

Штамповку заготовок выполняют в подкладных штампах на пневмомолоте с предварительным нагревом в печи. Затем следуют обрубка заусенца, отжиг, дробеструйная обработка заготовок.

Механическая обработка корпусов разделена на обработку до и после термической обработки. До термообработки с заготовки снимается основная часть припуска по контуру и пазам лезвийным инструментом на универсальном оборудовании мод. 184ФАС, 6Р82Г фрезерной группы, сверление отверстий – на сверлильных станках мод. 2Н118, нарезание резьб М4–М6 – вручную.

После металлообработки (закалка 59–64 HRC₃) корпус обрабатывают окончательно с промежуточным старением на станках шлифовальной группы мод. 3Б724, 3Г71М, СПЦ-20Б, 3Е711АФ1 с достижением технических требований чертежа по точности, расположению и шероховатости поверхностей со значительными трудовыми затратами, так как каждый элемент корпуса шлифуется отдельно.

Механическая обработка роликов. Получаемые закаленные заготовки роликов двух диаметров (5 и 7 мм) дорабатываются на предприятии на соответствие техническим требованиям чертежа с двухразовым промежуточным старением: точение галтелей на концах роликов, доводка по торцам и диаметру роликов на станках мод. 3Г71М, 3Д879.

Механическая обработка головок. Головки получают методом литья под давлением с последующей механической обработкой на универсальном оборудовании мод. 6Р82Г, 2Н118 с нарезкой резьб М2 и М3 в ручную.

Применяемая технология механической обработки деталей опоры качения требует значительных материальных и трудовых затрат, учитывая особенности применяемых заготовок.

Трудоемкость механической обработки деталей в нормо-часах составляет: корпуса – 2,7, головки – 0,52, ролика – 0,5.

Существующее метрологическое обеспечение представляет собой: специальные линейки и угольники, микрокаторы 0,5-ИГП, контрольное приспособление, индикаторы 2-МИГ, скобы рычажные, микрокатор 0,2-ИГП.

Предлагаемая технология

Разработанная прогрессивная технология механической обработки деталей роликовой опоры качения заключается в использовании прогрессивных видов заготовок, применении прогрессивной оснастки и инструмента, высокоточного оборудования большой производительности мод. 3Д756, 3Е11Ф1, оборудования с ЧПУ, а также группового метода обработки.

Данная технология имеет следующие отличия по сравнению с действующей: мерные заготовки корпусов опоры получают из полосы 30Х45-Б-1 (ГОСТ 103-76) или ШХ15СГ (ГОСТ 801-78) с минимальными припусками под механическую обработку на ленточно-отрезном автомате мод. 8А544. Этим достигается значительная экономия металла.

Способ чернового фрезерования заготовок в приспособлениях на универсальном оборудовании фрезерной группы заменен более производительным способом силового шлифования торцом круга на шлифовальном полуавтомате мод. 3Д756 с круглым столом.

Обработка резьбовых отверстий корпусов производится по программе на специальных станках с ЧПУ мод. СВМ1Ф4 в многоместных приспособлениях, включая нарезание резьб.

Обработка пазов корпуса производится на специальных пазошлифовальных станках мод. ОШ-365 методом глубинного шлифования.

Совмещены операции фрезерования угловых продольных пазов и фасок корпусов в одну операцию, выполняемую одновременно на группе деталей в многоместном приспособлении на станке мод. 6Р82Г набором фрез.

Обработка головок производится по программе на станках с ЧПУ мод. СВМ1Ф4, включая накатывание резьб бесстружечными метчиками (ГОСТ 18839-73).

Ролики изготавливаются из прутков на поточно-механизированной линии, скомпонованной из станков мод. ВШ-620, 11Т16А, 3Д18ОВ, 3342АД, 3М182А, 3А11ОВ, 3814ПС, СН-14 отечественного производства.

Разработаны два варианта получения заготовок роликов:

безотходный – высадка заготовки ролика с галтелями на высадочном автомате с последующей профильной шлифовкой каленой заготовки ролика;

малоотходный – шлифование прутка предварительно на бесцентровом станке мод. ВШ-620 с последующим точением роликов на автомате мод. 11Т16А.

Указанные отличия технологии значительно снижают трудоемкость изготовления деталей опоры.

Трудоемкость механической обработки деталей опоры по новой технологии в нормо-часах составляет: корпуса – 2,00, головки – 0,41, ролика – 0,30. Остальные детали опоры (вкладыши, планки) механической обработке не подвергаются.

Технические требования на изготовление деталей роликовой опоры качения можно обеспечить лишь на высокоточном финишном оборудовании в совокупности с оптимальными режимами обработки и контроля.

Метрологическое обеспечение механосборочного производства роликовых опор качения является одной из ключевых позиций при рассмотрении вопроса обеспечения их качества и надежности.

Анализ точностных характеристик деталей, входящих в изделие, позволил определить точностные параметры метрологического оборудования и использовать следующие средства контроля: КИМ-400, ВЕ-200, лазерный интерферометр «Хьюллет Паккарт», биениеметр класса А, кругломер (ГОСТ 17353-95).

Выводы:

1. Обработка деталей опоры на линиях из высокоточного оборудования с ЧПУ с максимальной концентрацией операций и применением в заготовительных цехах без- и малоотходных технологий получения заготовок с минимальным припусками обеспечивает снижение технологической себестоимости изготовления деталей.

2. Финишный контроль высокоточных деталей опоры должен производиться в специальных помещениях с постоянной температурой, оборудованных необходимыми средствами контроля.

3. Разработанная технология механической обработки деталей опоры качения снижает материальные и трудовые затраты изготовления изделий и может быть рекомендована для внедрения на предприятиях отрасли.

Список литературы: 1. Чарнко Д.В. Основы выбора технологического процесса механической обработки. – М.: Машгиз, 1978. – 320 с. 2. Мурашов А.М. Агрегатирование станочных приспособлений. – М.: Издательство стандартов, 1998. – 380 с. 3. Новиков М.П. Основы технологии сборки машин и механизмов. – М.: Машиностроение, 2000. – 275 с.

Г.П. КЛИМЕНКО, д-р техн. наук,
О.Ю. АНДРОНОВ, Краматорськ, Україна

ПІДВИЩЕННЯ СТАБІЛЬНОСТІ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ ЗБІРНИМИ РІЗЦЯМИ ВАЖКИХ ВЕРСТАТІВ З ЧПК

Розроблена математична модель надійності збірних токарних різців для важких токарних верстатів на основі аналізу полумарківських процесів для схеми ненапруженого дублювання з відновленням. Доказано експлуатаційними випробуваннями підвищення надійності збірних токарних різців для важких верстатів магнітоімпульсною обробкою.

Разработана математическая модель надежности сборного токарного резца для тяжелых токарных станков на основе анализа полумарковских процессов для схемы ненагруженного дублирования с восстановлением. Доказано эксплуатационными испытаниями повышение надежности сборных токарных резцов для тяжелых станков магнитоимпульсной обработкой.

On the basis of semimarkovian processes analysis for the scheme of not loaded duplication with restoration the mathematical model of modular cutter reliability for heavy lathe are developed. Proved performance tests to improve the modular cutter reliability for heavy machine-tool magnetic-charge processing.

Підвищення рівня автоматизації сучасного металорізального обладнання вимагає підвищеної уваги до стабільності обробки деталей, скороченню простоїв верстатів, в тому числі за причиною відмов різальних інструментів. Особливо це важливо для важких верстатів з ЧПК, вартість експлуатації яких дуже велика, а брак високотехнологічних важких деталей недопустимий.

Використання збірних токарних різців замість напаяних вимагає нового підходу до оцінки їх надійності. Оцінка надійності збірних токарних різців для важких верстатів має значення не тільки на стадії експлуатації, але й на стадії їх проектування. Розробка регламентів експлуатації різальних інструментів (рис. 1) на важких верстатах, формування цільових функцій для операцій оптимізації параметрів механічної обробки повинне проводитися, виходячи із заданого рівня надійності різального інструменту. У цей час використовується велику кількість показників, що дозволяють визначити безвідмовність, довговічність і ремонтпридатність інструмента окремо. Комплексним

показником надійності збірного інструмента як системи може служити коефіцієнт готовності.

Токарний різець збірної конструкції із погляду надійності можна представити як послідовну систему, тому що вихід з ладу будь-якого елемента різця приводить до відмови всієї системи. Показником надійності системи є коефіцієнт готовності, який характеризує як безвідмовність різця, так і його ремонтпридатність. Він визначає ймовірність знаходження системи в працездатному стані в деякий момент часу за умови, що в початковий момент система була в справному стані.

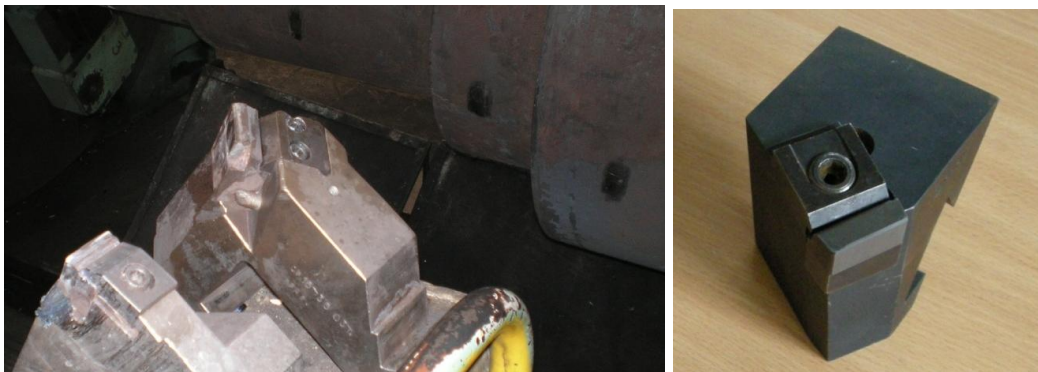


Рисунок 1 – Основні типи конструкцій токарних різців для важких токарних верстатів

Для спрощення математичної моделі надійності, розробленої в роботі [1] прийнято припущення про експоненціальний закон розподілу напрацювання та часу відновлення працездатності збірних токарних різців для важких верстатів, що знижало точність прогнозування надійності та розрахунку витрати різального інструменту.

Метою роботи є підвищення ефективності експлуатації збірних різців для обробки на важких токарних верстатах за рахунок підвищення надійності різальних інструментів магнітоімпульсною обробкою та визначення раціональних регламентів їх експлуатації.

Побудуємо полумарківську модель для схеми ненапруженого дублювання з відновленням, яка містить резервний елемент ізольований від навантажень і не втрачає своїх властивостей надійності; елементи системи неоднакові, мають різні показники надійності; часи безвідмовної роботи елементів і часи відновлення, розподілені за деякими законами функції, що відповідають, розподілу позначаються для часів безвідмовної роботи $F_1^{(i)}(t)$ і для часів відновлення $F_0^{(i)}(t)$.

Безліч станів системи Е в відповідності з наявним поняттям відмови розбивається на дві підмножини:

$$E = E_1 \cup E_0, E_1 \cap E_0,$$

де E_1 – інтерпретується як безліч працездатних станів системи; E_0 – безліч непрацездатних станів.

Введемо стани системи: 1 – перший елемент працездатний і включений до роботи, другий працездатний і перебуває в резерві (початковий стан системи); 2 – перший елемент працює; 3 – другий елемент працює; 4х – часткове відновлення (поворот пластини), 5х – повне відновлення (заміна пластини), з початку відновлення початкового моменту перебування в стані пройшов час x .

Безліч станів E в цьому випадку можна представити у вигляді

$$E = \{1, 2, 3\} \cup \{4, 5\} \times R_+, \quad (1)$$

де $R_+ = \{x : x \geq 0\}$ – безліч невід’ємних дійсних чисел.

Середній час перебування в станах дорівнюють

$$m_1 = \int_0^\infty \bar{F}_1^{(1)}(t) dt, \quad (2)$$

$$m_2 = \int_0^\infty \bar{F}_1^{(1)}(t) dt, \quad (3)$$

$$m_3 = \int_0^\infty \bar{F}_1^{(2)}(t) dt, \quad (4)$$

$$m(4x) = \frac{\int_0^\infty \bar{F}_0^{(2)}(t+x) dt}{\bar{F}_0^{(2)}(x)}, \quad (5)$$

$$m(5x) = \frac{\int_0^\infty \bar{F}_0^{(1)}(t+x) dt}{\bar{F}_0^{(1)}(x)}. \quad (6)$$

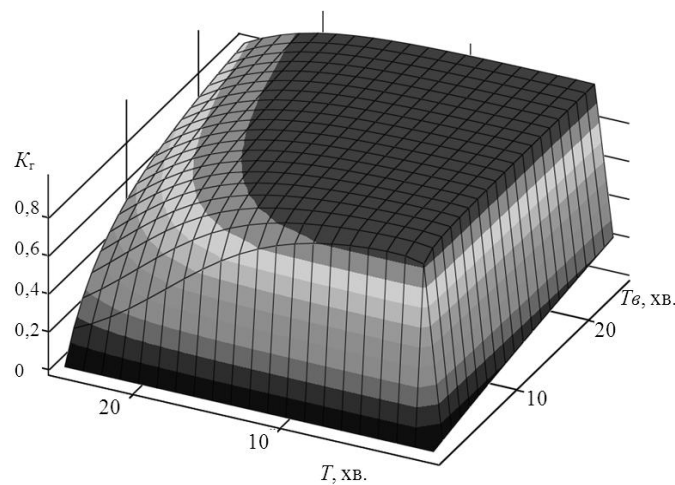


Рисунок 2 – Коефіцієнт готовності при експоненціальному розподілу періоду відновлення, та періоду стійкості за законом Вейбула

Коефіцієнт готовності

$$K_{\Gamma} = \left(1 + \frac{\sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{(1/t_1)^{nb_1+1}}{a_1^{nb_1} (nb_1+1)n!} + \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{(1/t_2)^{nb_2+1}}{a_2^{nb_2} (nb_2+1)n!}}{t_4 e^{-(0,3t_4)} \int_0^{\infty} t_4 e^{-(0,3t_4)} dx + t_5 e^{-(0,3t_{B5})} \int_0^{\infty} t_5 e^{-(0,3t_5)}(x) dx} \right)^{-1}. \quad (7)$$

Залежність можна використовувати для розподілу заданого рівня надійності всього токарного різця даної конструкції між його елементами, маючи апріорну інформацію про інтенсивність їх відновлення. Якщо ж необхідно сконструювати різець для даних умов обробки (тобто с заданою інтенсивністю відновлення), то для одержання заданого рівня надійності необхідно вибрати такі конструктивні розв'язки, які дозволять забезпечити певні цієї залежності показники ремонтпридатності.

Затрати на експлуатацію різального інструменту в функції часу мають тенденції до зростання, бо старіння окремих елементів машини призводить до необхідності вкладати деталі більші кошти для відновлення втрачених властивостей.

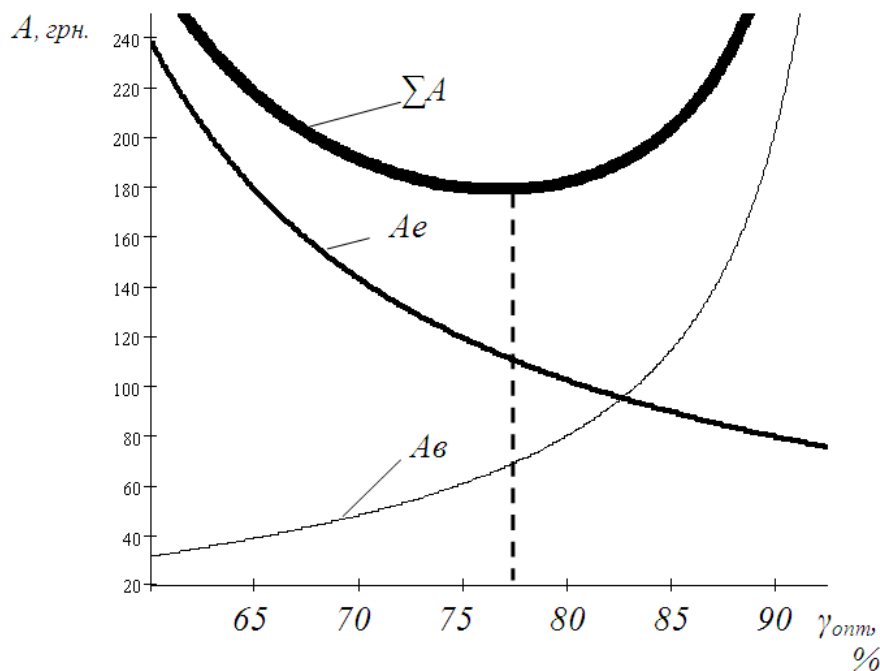


Рисунок 3 – Вплив вимог безвідмовності на затрати при виготовленні та експлуатації

При встановленні оптимального (з економічних позицій) рівня надійності різального інструменту слід мати на увазі, що вимоги безвідмовності двояко пов'язані із затратами на виготовлення та

експлуатацію. При вимогах до безвідмовності роботи різального інструменту потрібні підвищені затрати на його виготовлення.

Якщо виразити сумарні затрати на виготовлення A_v та експлуатацію різального інструменту A_e у функції ймовірності безвідмовної роботи періоду, то мінімум цієї функції визначить економічно доцільний рівень безвідмовності різального інструменту. При більшому впливі безвідмовності на експлуатаційні затрати оптимальне значення рівня надійності зсуватиметься в бік вищих значень цих затрат.

Мінімум функції сумарних затрат визначає економічно доцільний рівень надійності різальних інструментів за критерієм видатку, який складає 78%.

Для визначення доцільного рівня надійності за критерієм приведених затрат розрахуємо частинну двійну похідну наведених витрат і розв'яжемо рівняння:

$$\partial A_{nep} / \partial \gamma = 0. \quad (7)$$

Змінна частина собівартості обробки однієї деталі, що залежить від витрат пов'язаних з інструментом і змінними режимами різання, виражається рівнянням:

$$A_{nep} = t_0 E + \frac{t_{CM} E_T}{z_T} + \frac{\frac{A_u}{K} + A_z}{z_T}, \quad (8)$$

де t_0 – основний час обробки однієї деталі, хв.; E – вартість станко-хвилини, грн./хв.; E_T – сумарні витрати, пов'язані із простоями під час зміни інструмента, грн./хв.; t_{CM} – час зміни й настроювання інструмента, хв.; A_u , A_z – вартість інструмента й заточення відповідно, грн.; K – число періодів стійкості.

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 A_{np}}{(\partial \gamma)^2} = & \frac{C_t}{T_e v_\gamma \left(\frac{T_m - T_e}{T_e} \right)^{1/\mu}} \left(\left(a_{нал} t_{смпл} - C_2 + \left(\frac{A_u}{K_1} + A_{z1} \right) - x_4 \right) \left(\frac{T_m}{(-\ln \gamma)^{1/b}} - a \right)^{1/\mu} - \right. \\ & - \left(E T_e + \gamma \left(a_{нал} t_{смпл} - C_2 + \left(\frac{A_u}{K_1} + A_{z1} \right) - \frac{A_u}{K_2} + A_{z2} \right) + \right. \\ & \left. \left. + (E + a_{нал}) t_{смпл} \right) \frac{T_m \left(\frac{T_m}{(-\ln \gamma)^{1/b}} - a \right)^{1/\mu}}{b \mu \gamma \ln \lambda (-\ln \gamma)^{1/b} \left(\frac{T_m}{(-\ln \gamma)^{1/b}} - a \right)} = 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Аналізуючи залежності визначених параметрів від гама-відсотка можливо зробити висновок про те, що мінімальне раціональне значення дорівнює близько 0,8, після якого стрімко зростають показники видатку та перемінної собівартості, а мінімальне значення мінімуму, що забезпечує доцільний рівень надійності різального інструменту за критерієм приведених затрат дорівнює 0,64.

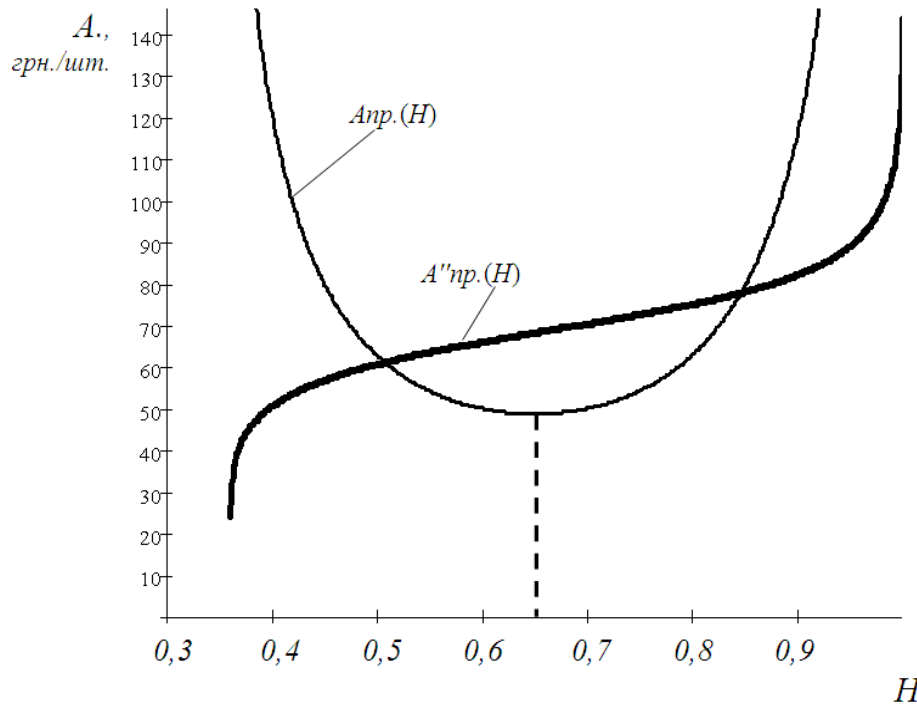


Рисунок 4 – Залежність показника змінної частини собівартості A та його прискорення від H

Одним з найбільш перспективних шляхів підвищення ефективності при створенні різального інструменту, в особливості з твердих сплавів, є використання сучасних методів зміцнення, таких як магнітоімпульсна обробка (МІО), спрямованих на формування оптимальних властивостей інструментальних матеріалів: твердості, мікроструктури, а також їх експлуатаційних характеристик.

Для оцінки ефекту зміцнення твердосплавних різців, підвищення їх безвідмовності проведений ряд експлуатаційних випробувань, які проведені в умовах ЗАТ НКМЗ на токарному верстаті мод. КЖ16274Ф3 збірними різцями висотою держака $H = 45$ мм (табл. 1).

Випробування проводилися відповідно до методики тривалих випробувань на надійність різального інструменту.

Математична обробка результатів випробувань (рис. 5) показала збільшення середнього періоду стійкості зміцненого інструмента, а також зменшення коефіцієнта варіації стійкості інструмента й зміни закону

розподілу стійкості з Вейбула до нормального, що особливо важливо для верстатів з ЧПК.

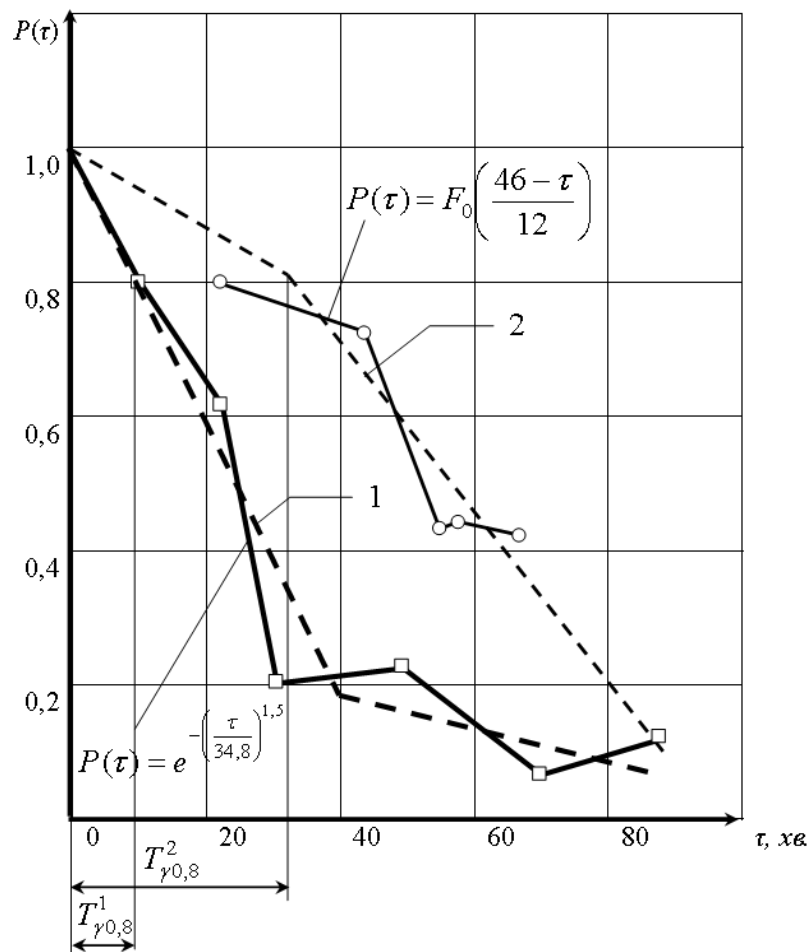


Рисунок 5 – Результати аналізу безвідмовної роботи токарних різців пластинами T5K10 при порівняльних випробуваннях 1 – T5K10, 2 – T5K10+MIO

— статистичні — — теоретичні

Розроблено математичну модель надійності збірного різця з використанням теорії полумарківських ланцюгів у вигляді залежності коефіцієнту готовності різця як системи від параметрів законів розподілу періодів стійкості та відновлення. Здобуто математичну модель прискорення зміни приведених витрат, мінімум яких відповідає раціональному рівню надійності різальної пластини з урахуванням їх витрати. На основі дослідження зміни експлуатаційних витрат при обробці на важких верстатах в залежності від рівня надійності і витрат на різальний інструмент доведено, що раціональний рівень надійності збірного різця в цілому складає в середньому 0,64.

Таблиця 1 – Результати порівняльних експлуатаційних випробувань твердосплавних збірних різців, зміцнених МІО

(деталь: Сталь 9ХС, 500х2500 мм; інструмент: Т5К10, $\varphi = 60^\circ$, режими різання: глибина $t = 12$ мм, подача $S = 1,6$ мм/об, швидкість $V = 52$ м/хв.)

№ партії	Характеристики розподілу стійкості					Змінення показників		
	Середній період стійкості $\bar{T}$, хв.	Коеф. варіації $V\tau$	$T\gamma$	Діапазон розсіювання	Закон розподілу	$V\tau$	T	$T\gamma_{0,8}$
1 без МІО	29	0,7	10	6...94	Вейбула $a = 34,8$ $b = 1,5$	–	–	–
2 зміцнений МІО	46	0,3	35	22...69	Нормальний $T = 46$ $\sigma = 12$	Зниження у 2,33 рази	Підвищення у 1,6 рази	Підвищення у 3,5 рази

Експлуатаційні тривалі випробування різальних пластин Т5К10 збірного токарного різця довели, що магнітоімпульсна обробка підвищує стабільність роботи різального інструменту, про що свідчить зменшення діапазону розсіювання стійкості від 5...94 до 22...66 хв. і зменшення коефіцієнту варіації від 0,7 до 0,4.

Список літератури: 1. Клименко Г. П. Надійність процесу експлуатації різального інструменту на важких верстатах / Г. П. Клименко, Я. В. Васильченко, О. Ю. Андронов, М. А. Ткаченко // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем : зб. наук. праць. – Краматорськ-Київ : ДДМА, 2004. – Вип. 15. – С. 46-51. 2. Клименко Г.П., Равская Н.С., Андронов А.Ю. Повышение надежности технологической системы при механообработке труднообрабатываемых материалов на тяжелых токарных станках Вестник двигателестроения. - 2009, Вып. № 2 (21). - С.116-119. 3. Королюк В.С, Турбин А. Ф. Процессы марковского восстановления в задачах надежности систем. – К.: Наук. думка, 1982. – 236 с.

С. Л. ЛЕОНОВ, д-р техн. наук,

В. Д. ГОНЧАРОВ, канд. техн. наук, Барнаул, Россия

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛИ

У статті розглянутий єдиний підхід до розробки імітаційних стохастичних моделей для прогнозування геометричних параметрів якості поверхні деталі на операціях механічної обробки. Показано реалізацію моделей для операцій лезової й абразивної обробки. Результатом моделювання є будь-які параметри шорсткості до побудови гістограм їхнього розподілу.

В статье рассмотрен единый подход к разработке имитационных стохастических моделей для прогнозирования геометрических параметров качества поверхности детали на операциях механической обработки. Показана реализация моделей для операций лезвийной и абразивной обработки. Результатом моделирования являются любые параметры шероховатость вплоть до построения гистограмм их распределения.

In article the uniform approach to development of imitating stochastic models for forecasting geometrical parameters of quality of a surface of a detail for operations of machining is considered. Realization of models for operations cutting and abrasive processing is shown. Result of modeling are any parameters a roughness down to construction of histograms of their distribution.

Геометрические параметры качества поверхности оказывают значительное влияние на эксплуатационные свойства деталей. Случайные колебания параметров технологических систем приводят к нестабильности геометрических показателей качества. При разработке технологических процессов изготовления деталей необходимо учитывать эти особенности, а алгоритмы проектирования операций должны быть адаптированы для учета динамики и стохастических характеристик технологических процессов.

Алгоритмы управления и проектирования технологических процессов должны ориентироваться на имитационное стохастическое моделирование формирования топографии и профиля поверхности детали. Для разработки таких моделей необходимо использовать подход, учитывающий как единые свойства и характеристики процессов механической обработки, так и их особенности, связанные с различной кинематикой и динамикой обработки поверхностей. Реализации методологии ориентированы на создание алгоритмов расчета и моделей таких операций.

Топография поверхности это функция двух аргументов: $y(l, c)$, где l и c – два взаимно перпендикулярных направления. Обычно эти направления выбирают вдоль и поперек следов обработки, а профилограммы, полученные в этих направлениях, называют продольными и поперечными. Но для получения топографии это не обязательно. Не обязательна даже перпендикулярность направлений l и c , но для упрощения расчетов удобно выполнять это условие.

Для практических расчетов топография должна храниться в виде дискретных значений, то есть функция двух аргументов представлена в виде двумерного массива $y_{l,c}$. Получение классической профилограммы $y(x)$ вдоль любого направления x сводится фактически к двумерной интерполяции по этому массиву. Очевидно, что отдельный профиль не несет информации о всей топографии и построение топографии возможно только по достаточно большому набору таких профилей.

Вычисление любых параметров шероховатости (например, по ГОСТ 2789-73) базируется на обработке профилограмм. После получения по топографии профиля поверхности не представляет никакого труда рассчитать эти параметры. Аналогичный подход можно использовать и для получения волнистости поверхности. Параметры волнистости не стандартизованы, но обычно используют выражения, аналогичные параметрам шероховатости.

Таким образом, получение топографии поверхности дает возможность рассчитывать любые геометрические показатели обработанной поверхности – размер, отклонения формы, волнистость и шероховатость. Возможность расчета этих показателей вдоль любого направления является важным преимуществом использования топографии поверхности. Поэтому при разработке моделей операций механической обработки нужно ориентироваться на получение именно топографии поверхности детали.

Задача обеспечения заданных геометрических параметров качества обработанной поверхности значительно усложняется, если учесть, что топография (профиль) поверхности имеет стохастические характеристики. Несмотря на то, что этот факт отмечается многими авторами, степень влияния случайных факторов на топографию и параметры шероховатости практически не исследована.

Обеспечение заданного размера детали с учетом его случайного колебания достаточно хорошо описано в литературе. Аналогичный подход может быть использован и для других геометрических параметров.

Например, на рис. 1 показана кривая плотности распределения параметра шероховатости Ra . Значение $Ra_{\text{черт}}$ задано конструктором. Выполнение условия $Ra \leq Ra_{\text{черт}}$ возможно только с определенной вероятностью, определяемой площадью под кривой плотности распределения слева от значения $Ra_{\text{черт}}$. Соответственно площадь правой части определяет вероятность брака по шероховатости.

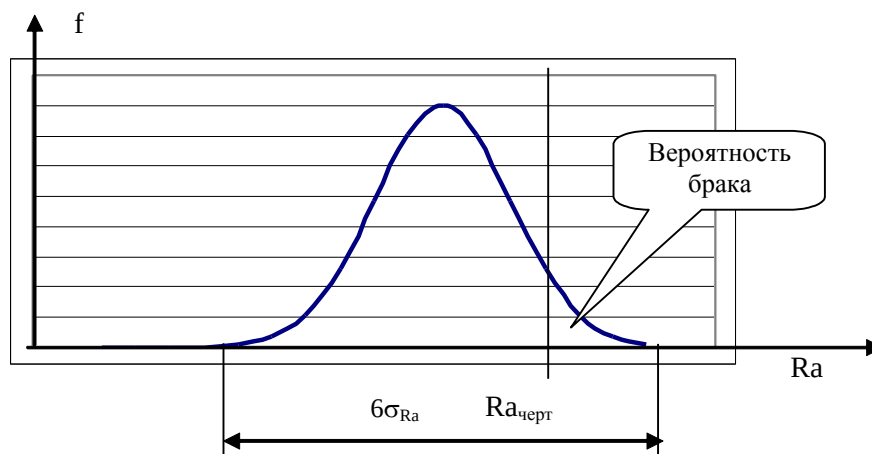


Рисунок 1 – Определение вероятности брака по шероховатости

Основные факторы, определяющие топографию поверхности детали, классифицированы А. Г. Сусловым при рассмотрении ее шероховатости. В соответствии с этим топография поверхности определяется

- геометрическим копированием рабочей части инструмента в материале заготовки;
- колебательными перемещениями инструмента относительно заготовки;
- упруго-пластическими деформациями поверхностного слоя обрабатываемого материала;
- случайными вырывами обрабатываемого материала.

Эти явления сопровождаются также износом инструмента, который влияет как на его размер, так и на форму его рабочей части и динамику процесса резания (силы резания, температура и т.п.). Необходимо учитывать, что налипание материала заготовки на инструмент (наростообразование) также может изменять его геометрию и динамику резания. Кроме того, геометрия инструмента, параметры режима резания, параметры оборудования и приспособлений, физико-механические свойства обрабатываемого и инструментального материала не являются постоянными, а содержат случайные составляющие.

В соответствии с этим в основу имитационной модели формирования топографии на операции механической обработки положен

процесс геометрического копирования профиля инструмента в материале изделия. С точки зрения теории множеств, процесс резания можно рассматривать как процесс многократного удаления множества точек $M_{\Phi\Pi ij}$, задаваемых фактическим профилем инструмента, из материала заготовки (множество M_i). Суммарный фактический профиль инструмента может состоять из нескольких подмножеств (например, профиль режущей части шлифовального круга определяется профилями составляющих его зерен, а профиль режущей части фрезы – профилями ее зубьев). Поэтому для его описания используется объединение подмножеств. При этом в каждый момент времени i из исходного профиля (множество M_{i-1}) вырезается пересечение этого множества с множеством фактического профиля инструмента. Этот процесс и описывает формирование нового профиля M_i :

$$M_i = M_{i-1} - \left[\left(\bigcup_j M_{\Phi\Pi ij} \right) \cap M_{i-1} \right] \quad (1)$$

На рис. 2 приведена структура обобщенной имитационной стохастической модели формирования геометрических параметров поверхности детали. Для конкретных операций механической обработки необходимо модернизировать ее под конкретные условия резания, формируя выражение (1).

В приведенной структуре учитывается, что:

- на формирование топографии обработанной поверхности влияют параметры инструмента, оборудования, приспособления и режима резания;
- стохастические составляющие параметров этих подсистем являются аддитивными;
- параметры этих подсистем определяются также динамическими свойствами имитационной модели (обратная связь);
- топография поверхности формируется за счет геометрического копирования, воздействия колебательных, упруго-пластических деформаций и собственно случайной составляющей;
- любые геометрические параметры поверхностного слоя формируются из топографии поверхности.

Подобные модели позволят решать достаточно широкий класс задач, связанных с проектированием операций механической обработки и в том числе поставлять данные для стохастической оптимизации подготовки поверхностей под нанесение покрытия и для размерного анализа жизненного цикла детали.

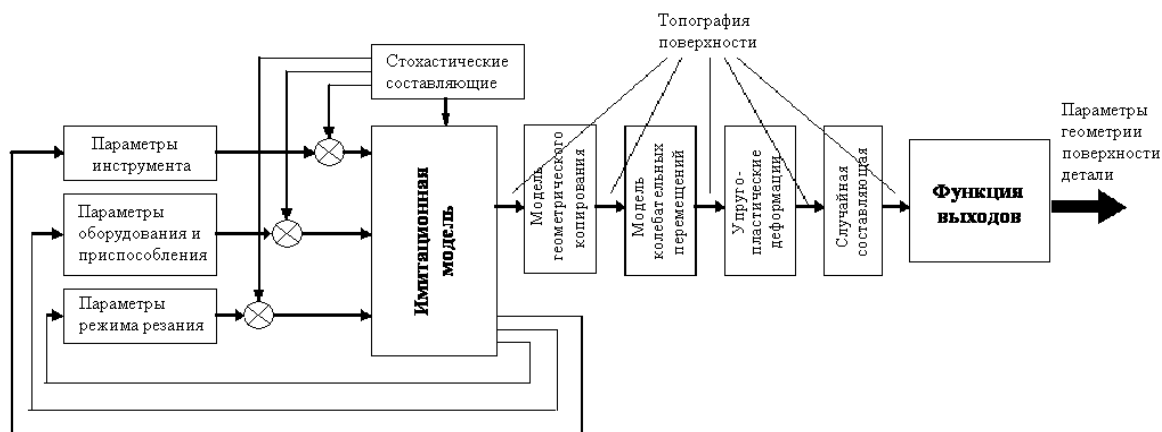


Рисунок 2 – Структура обобщенной имитационной стохастической модели операции механической обработки

Обобщенная модель применена для прогнозирования параметров шероховатости при точении, фрезеровании и абразивной обработке деталей.

На токарных операциях при геометрическом копировании параметры шероховатости определяются профилем одиночной риски. Поэтому вместо базовой длины можно использовать величину подачи S . Исходными данными является геометрия инструмента (углы в плане φ и φ_1 , радиус при вершине резца r) и подача S . В зависимости от значений исходных данных имеется 4 варианта профиля риски – рис. 3. Профиль риски представляется в табличном виде, по которому можно рассчитать любые параметры шероховатости.

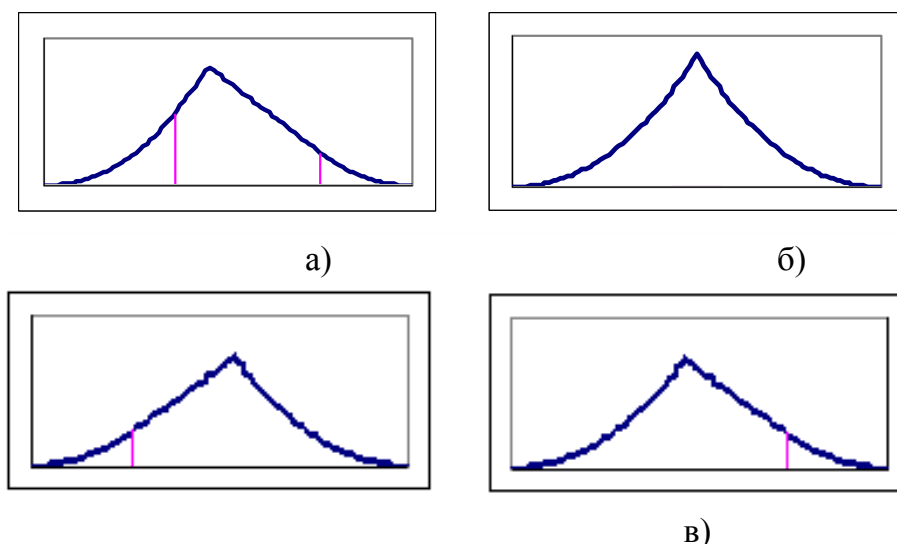


Рисунок 3 – Профиль риски: а – полный, б - в виде двух радиусных участков, в – 2 варианта неполного профиля риски.

Учет упругих и колебательных перемещений, а также - многопроходности производится с использованием уравнения баланса перемещений в технологической системе:

$$t_{\phi i} = \sum_{j=1}^i t_j - \sum_{j=1}^{i-1} \Delta r_j - \Delta_y + \Delta_{\text{вибр}} - \Delta_u \quad (2)$$

где $t_{\phi i}$, t_i – фактическая и номинальная глубина резания на i -м проходе; Δr_i – радиальный съем металла; Δ_y – упругие отжатия в технологической системе; $\Delta_{\text{вибр}}$ – колебательные перемещения; Δ_u – размерный износ инструмента.

Случайные колебания параметров геометрии инструмента (ϕ , ϕ_1 и g) учитываются алгоритмом метода Монте-Карло. При этом для всех указанных параметров используется закон распределения Гаусса. Учет пластических деформаций профиля производится с использованием экспериментальных данных. Для случайной составляющей используется ее спектральное разложение в виде:

$$y_c(x) = \sum_{i=1}^N A_i \sin(\omega_i x + \phi_i), \quad (3)$$

где частоты ω_i и амплитуды A_i определяются характеристиками обрабатываемого и инструментального материала, а фазы ϕ_i полагаются случайными с равномерным распределением на интервале $[0; 2\pi]$.

Описанный алгоритм стохастического моделирования позволяет рассчитывать профиль обработанной поверхности. При этом уравнение баланса перемещений (2) и спектральное разложение (3) рассматривается в фиксированные моменты времени с шагом, равным времени оборота заготовки. Для расчета полной топографии обработанной поверхности необходимо рассматривать более мелкий шаг по времени. При описании топографии удобно использовать цилиндрическую систему координат.

Аналогичный подход использован и для исследования геометрических параметров поверхности детали и при торцевом фрезеровании с учетом особенностей кинематики и динамики обработки. Исходными данными для расчета топографии при геометрическом копировании являются диаметр фрезы, геометрические параметры ее зубьев, параметры режима резания (частота вращения, минутная подача и глубина резания), а также – угол наклона шпинделя. Учет упруго-пластических деформаций, вибраций, износа инструмента и случайной составляющей производится так же, как и при точении.

Результаты расчета выводятся в виде двумерного массива. На рис. 4 приведен пример экранной формы для вывода визуализированной информации. Кроме того, возможен расчет любых параметров шероховатости на любом участке и вдоль любого направления.

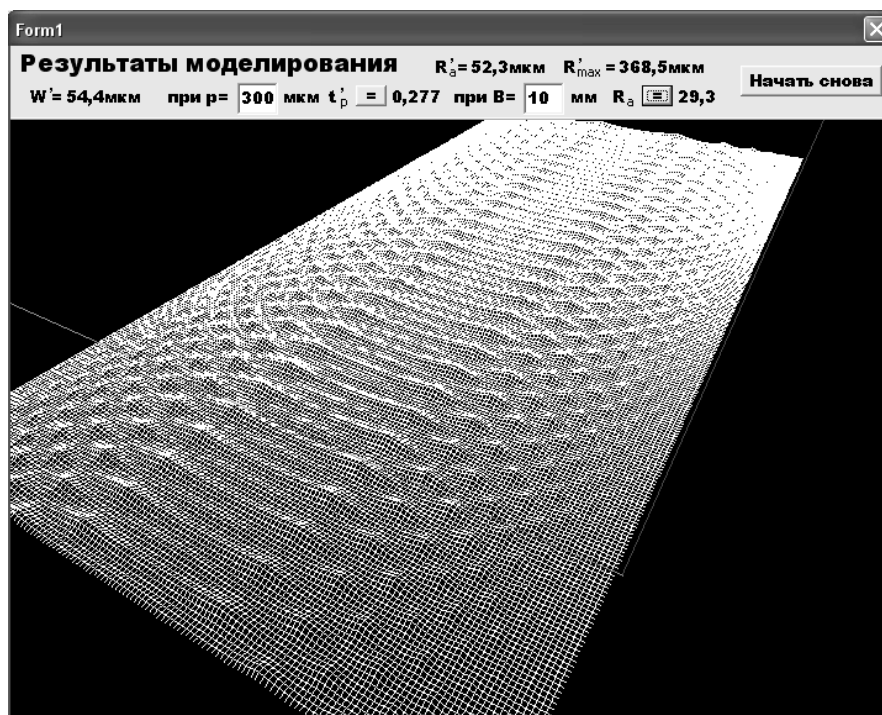


Рисунок 4 – Форма для вывода результатов моделирования при фрезеровании

Процессы абразивной обработки имеют особенности, существенно отличающие их от процессов резания лезвийным инструментом. Это беспорядочное расположение огромного количества абразивных зерен на рабочей поверхности шлифовального круга, их разновысотность и неправильная геометрическая форма, наличие у них округленных вершин, обеспечивающих, как правило, отрицательные передние углы резания. Кроме того, процесс резания протекает на высоких скоростях, существенно превышающих скорости резания при лезвийной обработке.

В соответствии со структурой обобщенной математической модели формирования геометрии поверхности детали, имитационный подход при моделировании операции шлифования заключается в следующем:

- сьем металла происходит за счет взаимодействия абразивных зерен с шероховатой поверхностью заготовки;
- профиль обработанной поверхности формируется за счет наложения профилей зерна на исходный профиль поверхности заготовки с учетом упруго-пластических деформаций металла;
- координаты режущих зерен и их профиль являются случайными параметрами, которые зависят от геометрии зоны контакта, режимов резания и характеристики инструмента.

Различные методы абразивной обработки отличаются только геометрией зоны контакта шлифовального круга и заготовки. Для круглого наружного врезного шлифования она изображена на рис. 5. При этом ее угловые размеры и текущая глубина резания описываются выражениями:

$$\cos \alpha = 1 - \frac{t_\phi R}{r(R+r)}; \quad t = \frac{t_\phi}{1 - \cos \alpha} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha). \quad (4)$$

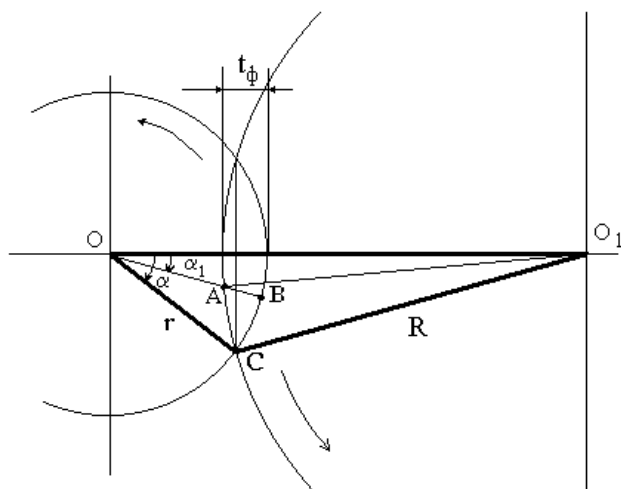


Рисунок 5 – Геометрия зоны контакта при круглом наружном шлифовании

При внутреннем шлифовании зона контакта имеет другой вид, что приводит к изменению соотношений (4). При хонинговании и суперфинишировании зона контакта имеет более простой вид прямоугольника. Для учета продольной подачи и нестационарности обработки используется уравнение баланса перемещений:

$$t_{\phi i} = t_{\phi i-1} + S_i - \Delta R_i - \Delta r_{i-1} - \Delta y_{\text{ynp}} + \Delta y_{\text{vudp}}, \quad (5)$$

где S – поперечная подача на оборот детали; ΔR , Δr – износ шлифовального круга и радиальный съём металла; $\Delta u_{\text{упр}}$, $\Delta u_{\text{вibr}}$ – упругая деформация технологической системы; $\Delta u_{\text{вibr}}$ – вибрационная составляющая; i – номер оборота заготовки

Размерный износ инструмента учитывается уравнением баланса перемещений (5). Кроме того, он влияет на распределение геометрических размеров зерен, участвующих в резании. Упруго-пластические деформации обрабатываемого материала учитываются искажением профиля режущих зерен с учетом коэффициента стружкообразования.

Разработанные модели позволяют прогнозировать распределение параметров шероховатости при лезвийной и абразивной обработке. На рис. 6 приведен пример расчетных плотностей распределений для случайной составляющей параметра шероховатости R_a .

В расчетах использовались следующие геометрические параметры инструмента: $\varphi = 60 \dots 65^{\circ}$; $\varepsilon = 90 \pm 1^{\circ}$; $r = 0,2 \dots 0,25$ мм; $V = 1,32$ м/с. Обработываемый материал – сталь 40.

Расчетные плотности распределения параметра шероховатости для круглого наружного шлифования приведены на рис. 7. При моделировании использованы следующие исходные данные:

Вариант 1: $\rho = 0,02 \dots 0,03$ мм, $N = 400 \dots 700$.

Вариант 2: $\rho = 0,02 \dots 0,03$ мм, $N = 300 \dots 900$.

Вариант 3: $\rho = 0,01 \dots 0,1$ мм, $N = 300 \dots 900$.

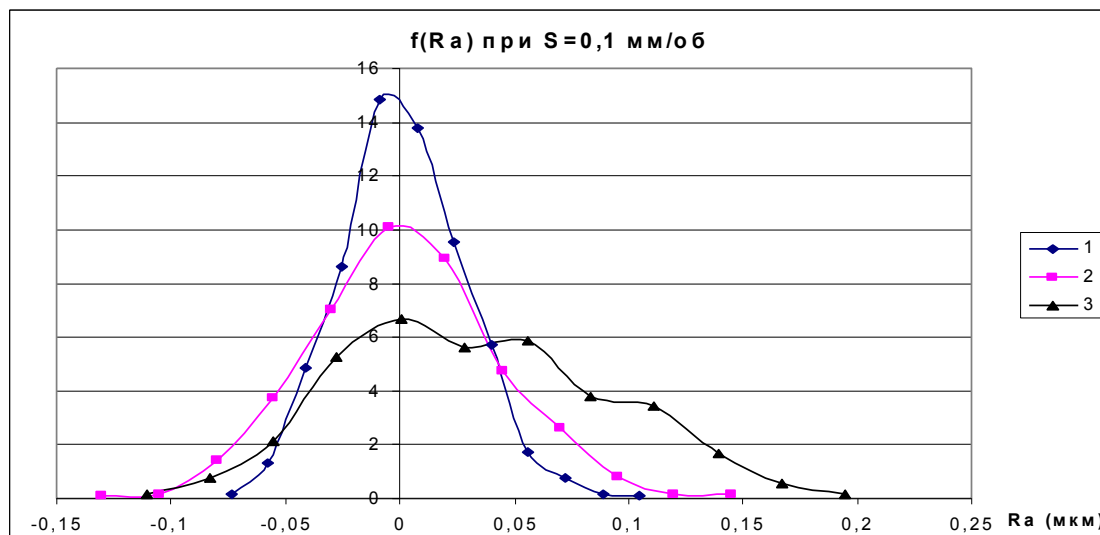


Рисунок 6 – Расчетные плотности распределения случайной составляющей параметра шероховатости R_a при точении.

1 – геометрическое копирование; 2 – копирование с учетом пластической деформации; 3 – копирование, пластическая деформация и случайная составляющая профиля

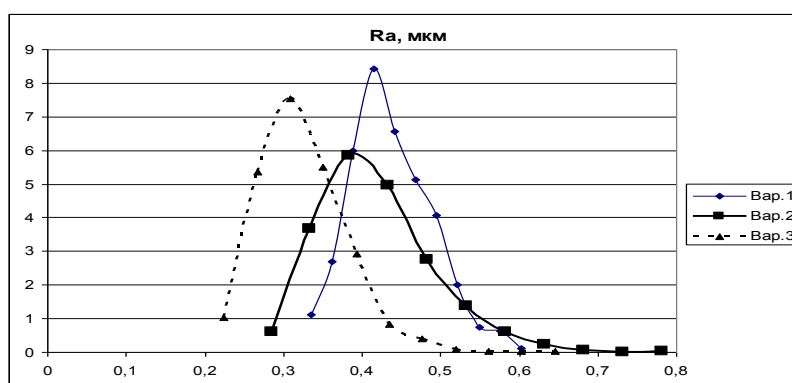


Рисунок 7 – Расчетные плотности распределения параметра шероховатости R_a при шлифовании

Экспериментальной проверкой доказана адекватности моделей реальным процессам механической обработки.

Аналогичные результаты получены и для других параметров шероховатости, как высотных, так и шаговых, а также и для относительной опорной длины профиля. На рис. 8 показаны примеры расчетных

плотностей распределения относительной опорной длины профиля при круглом наружном шлифовании. Из приведенных рисунков видно, что распределение параметров шероховатости не подчиняется нормальному закону распределения. Для его аппроксимации предложено комбинированный закон на базе бета-распределения:

$$f(tp) = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^2 \alpha_i \frac{\Gamma(a_i + b_i)}{\Gamma(a_i)\Gamma(b_i)} tp^{a_i-1} (100 - tp)^{b_i-1}; \sum_{i=1}^3 \alpha_i = 1 \quad (6)$$

где Γ – гамма-функция; a_i , b_i – параметры распределения; α_i – весовые коэффициенты.

Для подбора весовых коэффициентов и параметров распределения использован численный алгоритм оптимизации, встроенный в надстройку "Поиск решения" табличного процессора Excel. При оптимизации использован критерий χ^2 .

Необходимость использования выражения (6) вызвана тем, что значения параметра tp должна находиться в пределах 0...100%. Это условие не обеспечивается при использовании распределения Гаусса при малых или больших значениях уровня. Бета-распределение, лежащее в основе выражения (6) гарантирует нахождение tp в диапазоне его значений.

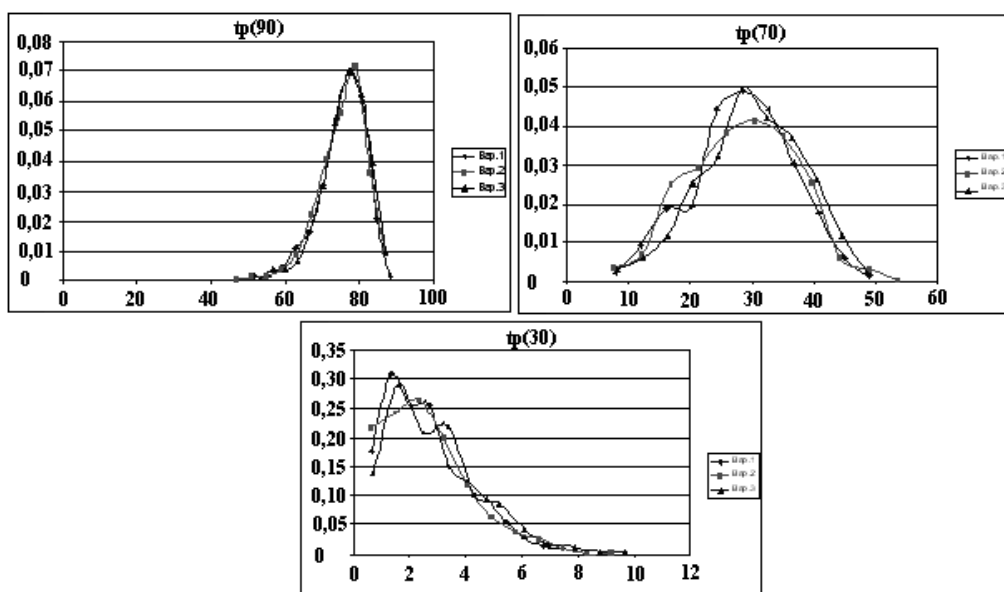


Рисунок 8 – Расчетные плотности распределения параметра шероховатости tp при шлифовании

Список использованных источников: 1. *Леонов С.Л., Зиновьев А.Т.* Основы создания имитационных технологий прецизионного формообразования. / Алт.гос.техн.ун-т им. И.И.Ползунова. –Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2006. -198 с. 2. *Суслов А.Г., Дальский А.М.* Научные основы технологии машиностроения. – М.: Машиностроение, 2002. -684 с.

Ю.И. СОЗОНОВ, канд. тех. наук,
Н.Ю. ЛАМНАУЭР, канд. тех. наук,
О.С. ЧЕРКАШИНА, Харьков, Украина

ВРЕМЕННАЯ МОДЕЛЬ КАЧЕСТВА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

У статті пропонується часова модель якості ТС, яка дозволяє оцінити будь-яку гарантію величини її напрацювання за всіма значеннями параметрів у встановлених межах. У роботі одержані числові характеристики моделей безрозмірного параметра та знайдена функція розподілу, яка має елементарний вигляд, що дозволяє оцінити параметри цієї моделі.

В статье рассматривается временная модель качества ТС, которая разрешает оценить любую гарантию величины ее наработки по всем значениям параметров в установленных границах. В работе получены числовые характеристики моделей безразмерного параметра и найдена функция распределения, которая имеет элементарный вид позволяющий оценить параметры этой модели.

The article proposed a temporary model quality of the TS, which can evaluate any size guarantee its achievements in all parameter values in the established limits. The work derived numerical characteristic of a dimensionless parameter and found the distribution function, that having is an elementary form, which allows estimating parameters of this model.

Введение. Использование контрольных карт Шухарта для количественных признаков получили большое применение [1, 2], которые используются для оценивания параметров производственного процесса в пусковом периоде, для управления процессом по уровню настройки, для управления процессом по технологическому рассеиванию и для ряда других проблем. При построении карт контроля в основном предполагается, что интересующий признак качества распределен нормально, что в основном неверно, так как все признаки качества есть ограниченные величины. И как показали исследования, они в основном не симметричны и имеют параметр формы, который меняется со временем. Поэтому в работах [3, 4] предлагается с использованием безразмерного параметра применять универсальную трех параметрическую модель признака качества для симметричного относительно номинального размера допуска. Проведенные исследования с помощью статистического моделирования показали, что предлагаемые оценки параметров данной модели имеют достаточно большую дисперсию, что делает невозможным их применять для малых

выборок. Поэтому стала задача построить временную модель качества технологической системы, которая была применима при любом допуске относительно номинального размера и найти лучшие для нее оценки параметров распределения.

Так как качество технологической системы (ТС) определяется через многие показатели качества, то построенная модель должна содержать все эти показатели. При этом, чем ближе к номинальным значениям удерживаются величины контролируемых показателей качества, тем выше качество ТС. При оценке качества ТС исходим из следующих предпосылок:

1. Определение качества ТС должно происходить из тех значений показателей, которые установлены технической документацией.

2. Качество системы должно оцениваться с учетом показателей качества изготавливаемой продукции, которые формируются (или изменяются) от времени t при выполнении ТС соответствующих технологических операций.

3. Показатели качества следует определять для цикла функционирования ТС - времени выполнения установленного объема работ.

При этом нужно иметь в виду, что в определенные моменты времени ТС может быть работоспособна по тем или иным принятым показателям качества (вещественным, энергетическим, информационным) и не работоспособна по другим.

Модель качества ТС. В сложной ТС контролируемые признаки x_i ($1 \leq i \leq N$, где N число признаков) разнородны, то есть имеют различную размерность. Это не позволяет рассматривать их как однородную совокупность случайных величин. Для комплексной же оценки качества системы необходимо иметь безразмерные величины $\{r_i\}$, чтобы можно было анализировать их вероятностно-статистическими методами.

Безразмерная величина может быть получена различными способами, но нормирующее выражение необходимо выбрать таким, чтобы величины отображались в удобной для использования относительной системе исчисления.

Можно предложить следующую безразмерную величину $r_i(t)$:

$$r_i(t) = (x_i(t) - x_i) / (x_i^* - x_i), \quad (1)$$

где x_i^* - допустимый верхний предел i -ого параметра; x_i - среднее значение допустимого интервала i -ого параметра.

Величина $r_i(t)$ может принимать любые значения, но все они таковы, что при выполнении неравенства $-1 < r_i(t) < 1$, процесс в системе протекает качественно, а при значениях $r_i(t) \geq 1$ или $r_i(t) \leq -1$ система имеет отказ по качеству.

Так как при любом конечном t величины $r_i(t)$ физически ограничены как "сверху", так и "снизу", то безразмерная величина $r_i(t)$ имеет нижний $r_{i.o}(t)$ и верхний пороги $r_{i.e}(t)$ значений $r_i(t)$, которые конечны. Причем всегда в один момент времени $r_{i.o}(t) < r_{i.e}(t)$. Поэтому моменты $t_{1,i}$ и $t_{2,i}$ отказа i -ого показателя качества системы определяется из решения уравнений $r_{i.o}(t_{1,i}) = -1$ и $r_{i.e}(t_{2,i}) = 1$, а качество этого показателя по времени характеризуется величиной $H_i = \min(t_{1,i}, t_{2,i})$. Тогда качество всей системы по контролируемым показателям можно принять за величину

$$H = \min_{1 \leq i \leq N} \{H_i\}. \quad (2)$$

Заметим, что при таком подходе оценки качества системы все наблюдаемые значения $r_i(t)$ ($1 \leq i \leq m$, m -объем испытаний) могут лежат в интервале $(-1+\varepsilon, 1-\varepsilon)$, где ε малое положительное число. Так как эта оценка H определяется по ненаблюдаемым значениям верхнего r_e и нижнего a порога безразмерной величины r .

Построим стохастическую модель безразмерной величины R . Массовые испытания некоторых признаков качества систем машиностроительного производства показали, что для определенных моментов t_j времени t среднее значение $\bar{r}$ и среднее квадратичное отклонение $\sigma(r)$ безразмерной величины r со временем изменяются в сторону увеличения, но при этом практически не меняются r_e и a . То есть изменение $\bar{r}$ и $\sigma(r)$ определяется изменением только формы кривой плотности распределения $f(r)$.

Другие массовые эксперименты некоторых параметров систем в определенных моментах t_j времени t оставляют неизменным $\bar{r}$ и $\sigma(r)$, но в тоже время достаточно существенно меняют r_e и a . То есть изменение осуществляется за счет сдвига a и формы кривой плотности $f(r)$.

В общем случае, как показывают массовые исследования, происходит изменение по времени t как $\bar{r}$, $\sigma(r)$, так и r_e , a . Исследования показали, что функция плотности (1) $f(r)$ должна иметь параметр формы кривой α , который со временем t также меняется, т.е. $\alpha = \alpha(t)$.

Наиболее эффективно, из экономических соображений по малой выборке оценивать r_e и a . Но малая выборка требует знания

математической модели признаков качества ТС [5], поэтому построим модель для безразмерной величины R .

Так как признаки качества системы, как отмечалось, имеют различную физическую природу, то практически нельзя найти общую физическую модель для всех, хотя и безразмерных, величин. Построим приближенную стохастическую модель из тех физических предпосылок, что безразмерные величины ограничены и, что функция плотности распределения $f(r)$ имеет различную форму, которую можно определить по результатам небольшого количества испытаний.

Итак, истинная функция плотности $f_u(r)$ безразмерной величины имеет вид:

$$f_u(r) = (r - a)(a + b - r)\psi_u(r), \quad (3)$$

где a - нижний порог величины R ; $r_k = a + b$ - верхний порог величины R ; $\psi_u(r)$ - истинная функция безразмерной величины R .

Так как $f_u(r) > 0$ для любых r принадлежащих $(a, a + b)$, то $\psi_u(r) > 0$ для любых r , принадлежащих $(a, a + b)$.

Истинную функцию $\psi_u(r)$ мы никогда не сможем найти. Поэтому найдем ее в приближении, которое может быть определено по некоторому количеству испытаний. Известно, чем больше будет иметь неизвестных параметров функция $\psi(r)$, тем более точно она может быть определена по результатам испытаний. Практика показала, что для определения неизвестных параметров по результатам испытаний оптимальное число параметров у функции плотности $f(r)$ должно быть не более трех, так как с увеличением параметров уменьшается точность их определения. Поэтому будем определять функцию $\psi(r)$ с одним неизвестным параметром, так как функция $f(r)$ уже содержит два неизвестных параметра a и b .

Представим функцию в виде степенной зависимости

$$\psi(r) = C(a + b - r)^{\alpha-1},$$

где C - нормирующий множитель; α - параметр формы.

В интервале функция $\psi(r) > 0$ и при различных параметрах формы α может, как убывать, так и возрастать и быть постоянной. Тогда функция плотности $f(r)$ имеет вид:

$$f(r) = C(r - a)(a + b - r)^\alpha,$$

а из условия нормировки имеем

$$f(r) = \frac{(2+\alpha)(1+\alpha)}{b^{2+\alpha}}(r-a)(a+b-r)^\alpha, \quad (4)$$

где $\alpha > -1$ и r принадлежит $[a, a+b]$.

Найдем функцию распределения $F(r)$ безразмерного параметра r для (4), с использованием линейной замены $z = r - a$.

$$F(r) = \begin{cases} 0 & , \text{при } r \leq a \\ 1 - \frac{(b+a-r)^{\alpha+1}(b+(1+\alpha)(r-a))}{b^{2+\alpha}} & , \text{при } a \leq r \leq a+b \\ 1 & , \text{при } r > a+b \end{cases} \quad (5)$$

Заметим, что предложенные модели (4) соответствуют распределению «типа I» в системе кривых Пирсона. Как известно [6], частный случай кривых Пирсона «типа I» есть бета-распределение 1-ого рода. Но даже для бета-распределения 1-ого рода функция распределения определяется через специальную неполную бета-функцию. Для предложенных моделей функции распределения $F(r)$ выражается через элементарные функции, что позволяет в дальнейшем использовать их в теории порядковых статистик для оценки параметров этих моделей по малой выборке.

Числовые характеристики и оценка параметров временной модели качества. Найдем числовые характеристики моделей (4) безразмерного параметра R , которые в дальнейшем будут использованы для оценки параметров этой модели.

Математическое ожидание случайной величины R для модели (4) имеет вид:

$$M(R) = a + \frac{2b}{\alpha + 3}. \quad (6)$$

Дисперсия определяется по формуле

$$D(R) = \frac{2(\alpha+1)b^2}{(\alpha+3)^2(\alpha+4)}. \quad (7)$$

Используя метод определения параметров распределений в [7], найдем модальное значение первой порядковой статистики.

Функция распределения наименьшего члена выборки объема m имеет вид [6] $F_1(t) = 1 - (1 - F(t))^m$, а плотность распределения наименьшего

члена выборки $f_1(t) = m(1 - (F(t))^{m-1})f(t)$. Тогда модальное значение наименьшего члена выборки определяется из уравнения

$$[1 - F(t)]f'(t) - (m-1)f^2(t) = 0. \quad (8)$$

Для модели (4) уравнение (8) имеет три действительных корня, из которых только один дает модальное значение наименьшего члена выборки в $(a, a+b)$.

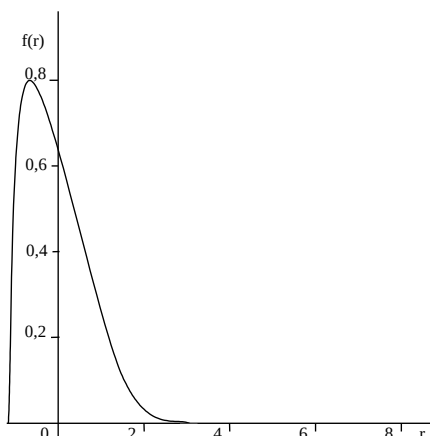


Рисунок – Функция плотности безразмерного параметра, полученная предложенным методом оценки параметров

$$t_{\text{mod},i} = -\frac{-1 + mb - \alpha - b + \sqrt{1 - 2mb + 2\alpha + 2b + m^2b^2 + 2mb\alpha - 2mb^2 + \alpha^2 - 2\alpha b + b^2}}{2(m-1)} + a + b.$$

Приравнявая, данное модальное значение наименьшему нормированному значению выборки r_1 и решая это уравнение относительно α , получим

$$\alpha = \frac{a^2m + r_1^2m - 2amr_1 + mba - mbr_1 + 2ar_1 - a^2 + a - r_1 - r_1^2 + b + br_1 - ba}{r_1 - a}. \quad (9)$$

Решая систему трех уравнений (9), (7) и (6) подставляя вместо теоретической дисперсии $D(R)$ исправленную выборочную дисперсию S^2 , а вместо математического ожидания $M(R)$ выборочное среднее r_c нормированной случайной величины R , можно найти оценки искомых параметров α , a и b . Так как полученные аналитические оценки очень громоздкие, то проще находить эти оценки по составленной программе в системе MAPLE.

Так, например, при измерении одного параметра в некоторый момент времени были получены значения

$x:=[13,83; 13,84; 13,86; 13,87; 13,88; 13,89; 13,90; 13,92; 13,95; 13,96]$

Номинальное значение для этого параметра 13,9. Верхнее допустимое значение $\delta_1=0,06$, а нижнее $\delta_2=-0,07$. Используя программу, по формуле (1) были найдены все 10 нормированных значений. Для них были определены $r_c = -0,06666666673$, $S = 0,5794846581$ и $r_1 = -0,86666666667$. Решение системы при найденных значениях позволило оценить параметры модели $a = -0,9584412184$, $b = 8,156878184$ и $\alpha = 15,29358815$. Так как верхний порог больше единицы, то в это время есть вероятность выхода измеряемого параметра за допуск и эта вероятность равна 0,05602544685. На рисунке построена функция плотности (4) при найденных параметрах

Проведенный анализ с использованием статистического моделирования показал, что предложенные оценки модели (4) имеют при одних и тех же значениях с использованием более общей формулы (1) имеют дисперсию меньшую, чем ранее предложенные в [3,4]. Поэтому данные оценки параметров модели (4) могут быть применимы для малой выборки.

Выводы. 1. Временная модель качества ТС позволяет оценить любую гарантию величины наработки ТС, включая и 100%, по всем значениям ее параметров в установленных пределах.

2. Приближенная модель безразмерной величины качества может быть использованы при любых контролируемых параметрах независимо от их физической природы и статистических распределений.

3. Для модели безразмерной величины найдена близкая к истинной функции распределения, которая имеет элементарный вид, что позволяет оценить параметры этой модели.

4. Разработанная методика оценки качества ТС достаточно проста и может быть использована для оценки качества любой ТС.

Список литература: 1. Х. –Й. Миттаг, Х. Ринне. Статистические методы обеспечения качества. Пер. с нем. – М.: Машиностроение, 1995. – 616 с. 2. Контроль качества продукции машиностроения. Под ред. А. Э. Артема. М.: Издательство стандартов, 1999. – 448 с. 3. Куцин А. Н., Созонов Ю. И. Оценка качества технических систем // Сборка в машиностроении, приборостроении, М.: – 2004. - №7.- С.23-27. 4. Резниченко Н. К. Безразмерный комплексный параметр качества технологической системы // Високі технології в машинобудуванні: Збірник наукових праць, - Харків: «ХПІ». -2006. – Вип.1 (12) – С. 417 – 423. 5. Гаскаров Д. В., Шаповалов В. И. Малая выборка. – М.: Статистика, 1978. – 248 с. 6. Пугачев В. С. Теория вероятностей и математическая статистика. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. – 496с. 7. Ламнауэр Н. Ю., Пташный О. Д., Созонов Ю. И. Оценка надежности вращающихся изделий // Машиноведение и САПР: Сборник научных трудов, - Харків: НТУ «ХПІ». -2008. –№42 – С. 75– 80.

А. Є. СТЕЦЬКО, Львів, Україна

ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ФОРМУВАННЯ ЯКОСТІ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ МАШИН В ПРОЦЕСІ ЇХ ВИГОТОВЛЕННЯ ТА ВІДНОВЛЕННЯ

У роботі теоретично розглянуто та експериментально підтверджено вплив режимів різання для формування якісних показників композитних покриттів поверхонь деталей машин, отриманих після комплексного методу виготовлення та відновлення.

В работе теоретически рассмотрено и экспериментально подтверждено влияние режимов резания для формирования качественных показателей композитных покрытий поверхностей деталей машин, полученных после комплексного метода изготовления и восстановления.

The paper examined theoretically and experimentally confirmed the influence of cutting conditions for the formation of composite quality indicators of surface coatings of machine parts, obtained after a comprehensive method of production and recovery.

Актуальність проблеми. Пріоритетним напрямком розвитку машинобудування є впровадження прогресивних технологій. Це стосується як нових технологій виготовлення, зміцнення та відновлення деталей машин, так і вдосконалення технологій механічної обробки. З вдосконаленням машин об'єм механічної обробки збільшується, на перший план виходять фінішні процеси. На сьогодні в промисловому виробництві широко застосовуються матеріали з гетерогенною структурою, які мають високу стійкість в умовах інтенсивного зношування. Проте на сьогодні недостатньо розвинутими є способи формування гетерогенних покриттів та методи їх механічної обробки.

Аналіз публікацій. Як вказано в роботах [1], [2], деталі з композитними покриттями володіють високими експлуатаційними характеристиками, що значно підвищує їхню зносостійкість і забезпечує підвищений ресурс роботи.

Цілий напрям досліджень стосується створення евтектичних сплавів і покриттів [3], які мають високу твердість і зносостійкість, підвищують ресурс роботи деталей машин при їхній експлуатації в екстремальних умовах контактної взаємодії, в т.ч. при ударних навантаженнях та при дії абразивного середовища, а також велику товщину (до 3000 мкм). Але

спосіб неможливо використовувати для зміцнення внутрішніх циліндричних поверхонь і деталей складного профілю.

Для створення на поверхнях деталей композитних електролітичних покриттів [4], що полягає в нанесенні хрому та його сульфідів сумісно у вигляді дисперсної суміші газотермічним, електроіскровим або іонно-плазмовим методом. Для отримання дисперсної суміші синтезують сульфід хрому, отриманий спечений матеріал подрібнюють, змішують з порошком хрому (1,0 – 50,0% мас. хрому і решта – сульфід хрому).

Процесами обробки важкооброблюваних матеріалів займаються ряд вчених. Аспекти обробки гетерогенних покриттів інструментом, оснащених пластинами з твердих сплавів та інструментом з надтвердих матеріалів висвітлено в роботі [5]. Автори наводять дані про чорнову обробку гетерогенних покриттів інструментом, оснащених пластинами з твердих сплавів – груп ВК і ТТК. Чистову обробку гетерогенних покриттів, коли потрібно зрізати малі припуски, проводять інструментом з полікристалічних надтвердих матеріалів (ПНТМ), який дозволяє підвищити продуктивність механічної обробки за рахунок підвищення швидкості різання. При цьому знижується собівартість механічної обробки. У роботі показано, що при точінні кристалічних покриттів на контактних ділянках інструменту з ПНТМ на основі кубічного нітриду бору (КНБ), на відміну від інших видів інструментальних матеріалів, не спостерігається слідів адгезійного зношування. Також досліджено, що з підвищенням швидкості різання зменшується вплив неоднорідності структури оброблюваного матеріалу на інтенсивність зношування інструменту.

Автори [6] вказують, що для лезової обробки деталей із загартованих сталей, чавунів і напиленими покриттями на основі Fe, Co і Ni застосовують інструменти, оснащені полікристалічними надтвердими матеріалами на основі щільних модифікацій нітриду бору – вюрцитоподібної та сфалеритної. Застосовуючи даний інструмент підвищується продуктивність процесу механічної обробки за рахунок суттєвого підвищення швидкості різання. Поряд з тим, авторами відзначено, що обробку інструментами з надтвердих матеріалів слід проводити на верстатах підвищеної жорсткості.

У роботі [7] наведено результати проведених досліджень процесу точіння покриттів з аморфно-кристалічною структурою (систем Fe-B, Fe-Si-B, Fe-Cr-B). Для цього використовувалися інструменти з ПНТМ на основі КНБ. Глибини різання, через невеликі товщини покриття не

перевищували десятих долей міліметра. Отримані вторими результати свідчать, що особливості структури покриттів суттєво обумовлюють шорсткість обробленої поверхні. Зростання значення фрактальної розмірності сукупності механічних властивостей матеріалу покриття D_s , яка характеризує гетерогенність його структури, значно збільшується висота мікронерівностей та спостерігається зменшення впливу режимів різання на шорсткість обробленої поверхні. Автори роблять висновок, що точіння інструментами, оснащеними ПНТМ на основі КНБ – ефективний метод обробки покриттів з структурою, близькою до композитної (наявністю твердої та м'якої фаз), який забезпечує можливість отримання стану поверхневого шару з потрібними по умовам експлуатаційного навантаження деталей параметрами.

У роботі [8] наведено результати з цілого комплексу досліджень точіння загартованих сталей, відбілених чавунів, нікелевих сплавів, неметалічних матеріалів. Доказано, що одним з ефективних способів підвищення продуктивності обробки за рахунок скорочення основного часу є застосування високих швидкостей обробки, а це для даних видів деталей є можливим при застосуванні різальних інструментів оснащених надтвердими матеріалами на основі КНБ.

Як видно із розглянутих досліджень авторів, на даний момент створення композитних покриттів на поверхнях деталей машин проводиться із застосуванням прецизійних вартісних технологій, які вимагають спеціального обладнання та високої кваліфікації працівників.

Для механічної обробки композитних покриттів слід застосовувати інструменти із ПНТМ на основі кубічного нітриду бору, що дозволяють ефективно обробляти широку гаму сучасних конструкційних матеріалів з високими механічними властивостями (в тому числі високої поверхневої твердості).

Мета досліджень. Розробка сучасного і доступного методу отримання і режимів механічної обробки композитних покриттів високої інтегральної твердості для отримання потрібних якісних показників робочих поверхонь деталей машин.

Виклад основної частини. Комплексний метод хімічної обробки і дифузійного хромування полягає у двох послідовних етапах: нанесення на поверхню зміцнювального зразка нікелькобальтфосфорного хімічного покриття товщиною біля 10–12 мкм способом хімічного осадження і наступного дифузійного хромування у порошковому середовищі в ретортах з плавким затвором [9].

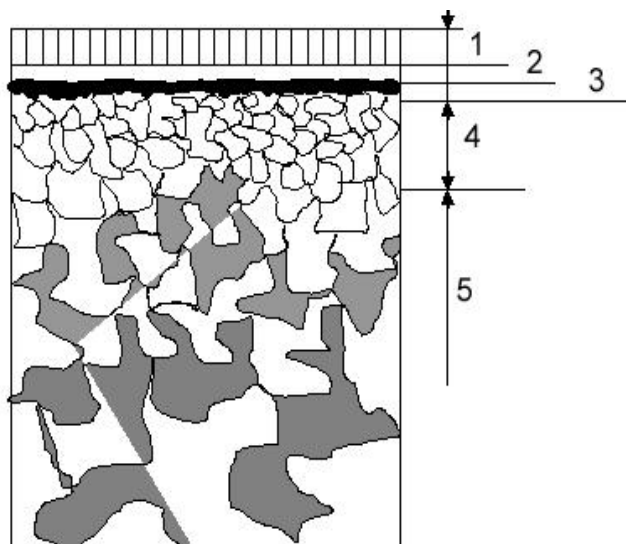


Рисунок 1 – Будова зміцненого шару, отриманого комплексним методом хімічної обробки і дифузійного хромування (1 – композитна зона; 2 – зона твердого розчину хрому в α -залізі; 3 – евтектоїдна зона; 4 – знеуглецьована зона; 5 – серцевина деталі)

У результаті утворюється зміцнене покриття, що складається з 4-ох зон (рис. 1): зовнішня композитна зона 1, яка складається із стовпчастих карбідів хрому в матриці твердого розчину Cr в α -Fe товщиною до 250 мкм та інтегральною мікротвердістю 12 ГПа; зона 2 твердого розчину хрому в α -залізі товщиною 30-40 мкм та мікротвердістю 4,5 ГПа; евтектоїдна зона 3 товщиною біля 30 мкм та мікротвердістю 4 ГПа і знеуглецьована зона 4 товщиною 160–180 мкм та мікротвердістю 1,4–1,6 ГПа за феритною складовою і серцевина деталі 5. Композитна будова зони 1 дозволяє значно підвищити ресурс роботи завдяки релаксації накопичених у ході роботи внутрішніх мікронапружень у м'якій фазі – твердому розчині хрому в α -залізі, в той час, коли основне навантаження буде сприймати тверда фаза – стовпчасті зерна карбіду хрому високої твердості (біля 18 ГПа).

Аналіз результатів досліджень із формування висоти профілю шорсткості використаний різними авторами при відповідних методах обробки [10], [11] дозволяє зробити висновок, що на утворення шорсткості при певних методах механічної обробки впливають такі фактори: геометрія робочої поверхні інструмента та кінематика його робочого руху; коливальні переміщення інструмента відносно оброблювальної поверхні; пружні та пластичні деформації оброблювального матеріалу в зоні контакту з робочим інструментом; шорсткість робочої частини інструмента; вириви частин оброблювального матеріалу. Враховуючи

вищенаведені фактори, отримано [12] узагальнену залежність розрахунку кінцевої шорсткості обробленої поверхні:

$$\begin{aligned}
 Rz = & \frac{S^2}{8r_\epsilon} + \frac{a_{\min}}{2} \left(1 + \frac{r_\epsilon \cdot a_{\min}}{S^2} \right) + \frac{b_{\text{зсуб}}}{\frac{1}{\tan \varphi_1} + \frac{2r}{S}} + \\
 & + \frac{r(1 - \cos \varphi_1) + \sin \varphi_1 \left[S \cos \varphi_1 - \sqrt{S \sin \varphi_1 (2r - S \sin \varphi_1)} \right]}{\cos \gamma} \times \\
 & \times \frac{c_y S^{y_p} V^{z_p} \left[HB_{\max}^n t^{x_p} - HB_{\min}^n \left(t - \frac{Rz_{\text{вих}}}{10^3} \right)^{x_p} \right] \left(\frac{1}{j_{\text{верст}}} + \frac{1}{j_{\text{инстр}}} + \frac{1}{j_{\text{заг}}} \right)}{HB_{\text{сер}}^n} \times \\
 & \times \frac{0,5\rho \left(1 - \frac{2\tau_0}{\sigma_T} \right)}{\frac{1}{\tan \varphi_1} + \frac{2r}{S}} + Rz_{bp}
 \end{aligned} \tag{1}$$

Після реалізації комплексного методу виготовлення деталей машин, реальний розмір заготовки зростає залежно від режимів обробки. Наприклад, для сталі 45 при 7 годинах дифузійного хромування при 1050°C та годинної ізотермічної витримки при 800°C за рецептурою хімічного покриття № 3 він складає 100 мкм, для У10 – 80 мкм (рис. 2).

Для розрахунку припуску на обробку слід виготовляти заготовку, враховуючи приріст реального розміру, а також припуск на механічну обробку для отримання на виготовленій деталі потрібної точності та шорсткості робочої поверхні.

Як видно з отриманих залежностей (рис. 2), для 7 год. дифузійного хромування приріст Δ реального розміру є достатнім для відновлення деталей до номінального розміру, а більше 7 год. є незначним (до 7-8 мкм).

Отримані в роботі залежності відносної зміни розміру ζ деталей після комплексної обробки (рис. 3) показують незначний приріст припуску на механічну обробку при відновленні деталей до номінального розміру, що підтверджує використання в якості різального інструменту різців з надтвердих матеріалів, які дозволяють зрізати мінімальні припуски завдяки малим радіусам заокруглення вершини різця:

$$\zeta = (d_{\text{заг.}} / d_{\text{дет.}}) \cdot 100\%, \tag{2}$$

де $d_{\text{заг.}}$ – розмір заготовки до застосування комплексного методу, мм; $d_{\text{дет}}$ – розмір деталі, зміцненої комплексним методом, мм.

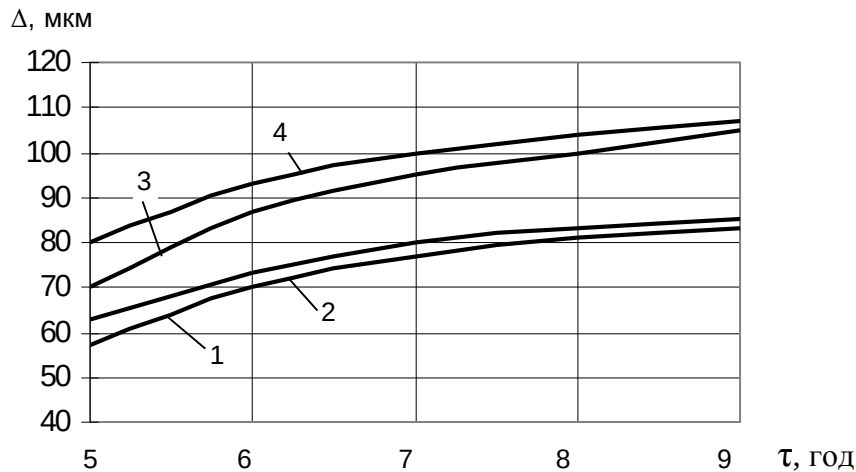


Рисунок 2 – Вплив комплексної обробки на приріст товщини зміцненого шару поверхні деталі для дифузійного хромування 5-9 год.: 1 – на сталі 45; 2 – на сталі 45 з ізоотермічною витримкою 1 год. на сталі 45; 3 – на сталі У10; 4 – з ізоотермічною витримкою 1 год. на сталі У10

Враховуючи те, що обробка даних шарів буде вестися: по-перше, для отримання оптимальної шорсткості робочих поверхонь деталі та її форми після утворення композитної зони після комплексного методу; по-друге, для обробки деталі з даним покриттям під ремонтний розмір (при потребі), процес слід проводити таким чином, щоб з поверхні виробу видалявся шар покриття не більше 0,05 мм, обробку слід проводити таким чином, щоб глибина різання була рівною 0,03–0,05 мм.

Обробка поверхні деталі, виготовленої комплексним методом хімічної обробки і дифузійного хромування проводилася на токарно-гвинторізному верстаті моделі 1А616П (рис. 4) із керуванням оборотів шпинделя електромагнітними муфтами, який відповідає вищевказаним вимогам.

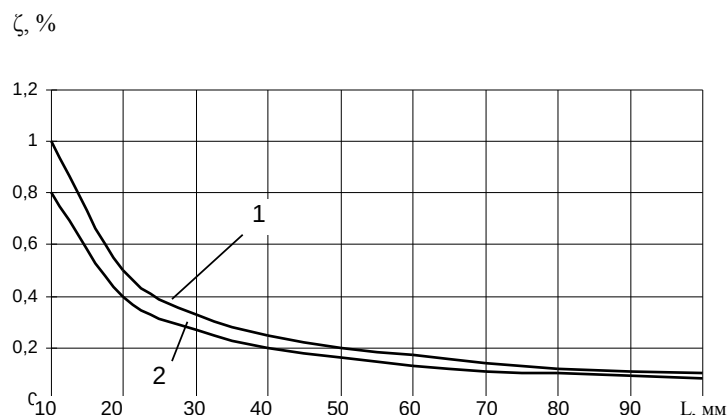


Рисунок 3 – Залежність відносної зміни розміру деталі після комплексної обробки від відновлюваного розміру деталі: 1 – для сталі 45 хімічне покриття і дифузійне хромування 7 год. з ізоотермічною витримкою 1 год.; 2 – для сталі У10 рецептури хімічне покриття і дифузійне хромування 7 год. з ізоотермічною витримкою 1 год.

Обробка зразків проводилася прохідним токарним різцем з пластинкою із надтвердого матеріалу композит 10 (передній кут $\gamma=-5^\circ$; головний задній кут $\alpha=15^\circ$; допоміжний задній кут $\alpha_1=15^\circ$; головний кут у плані $\varphi=30^\circ$; допоміжний кут у плані $\varphi_1=20^\circ$; кут нахилу головної різальної кромки $\lambda=0^\circ$; радіус при вершині різця $r=0,4$ мм).

Обробка зовнішніх поверхонь деталей (сталь 45 $\varnothing 47$ мм), після комплексного методу виготовлення і відновлення поверхні хімічною обробкою і дифузійним хромуванням ($T = 1050^\circ\text{C}$, $\tau = 7$ год.) із використанням ізотермічної витримки ($T = 800^\circ\text{C}$, $\tau = 1$ год.) проведена за режимами: подача $S = 0,065$ мм/об, глибина $t = 0,05$ мм. Профілограма (рис. 5) показала, що при застосуванні вищевказаних режимів механічної обробки зміцнених шарів комплексним методом хімічної обробки і дифузійного хромування, величина шорсткості не перевищує 2 мкм, що підтверджує виконані теоретичні розрахунки.

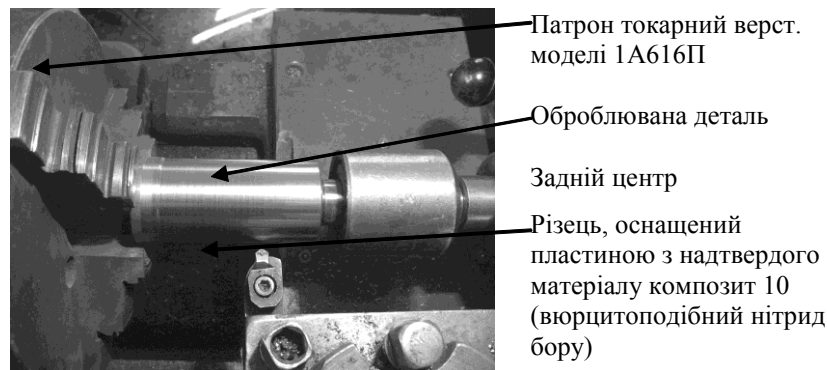


Рисунок 4 – Обробка поверхонь деталей, виготовлених комплексним методом хімічної обробки і дифузійного хромування на токарно-гвинторізному верстаті моделі 1А616П

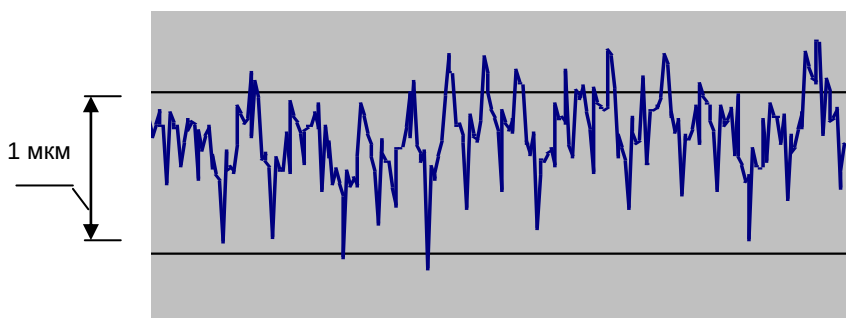


Рисунок 5 – Профілограма шорсткості поверхні зразка зі сталі 45 виготовленої комплексним методом хімічної обробки і дифузійного хромування після механічної обробки – точіння, виконаного за режимами: $S = 0,065$ мм/об., $t = 0,05$ мм, $V = 200$ м/хв., $\gamma=-5^\circ$; $\alpha=15^\circ$; $\alpha_1=15^\circ$; $\varphi=30^\circ$; $\varphi_1=20^\circ$; $\lambda=0^\circ$; швидкість датчика–10 мм/хв; вертикальне збільшення–4 000; частота запису–20 Гц

Мінімальна шорсткість лезової механічної обробки зміцненої поверхні деталей машин комплексним методом хімічного оброблення і дифузійного хромування забезпечується при подачі – $S = 0,065$ мм/об. і менше, глибині різання – $t = 0,05$ мм та швидкості не нижче 150 м/хв. При цьому слід забезпечувати радіус вершини різця в межах 0,2...0,4 мм. При даних умовах забезпечується шорсткість поверхні не вище $R_z < 10$ мкм, або $R_a < 2$ мкм.

Порівняння залежностей шорсткості отриманої поверхні деталей, виготовлених комплексним методом після механічної обробки інструментом (крива 1) з вюрцитоподібного нітриду бору (композит 10) і отриманими теоретичними залежностями (крива 2) показує розбіжність результатів в межах 10 – 15% (рис. 6). Підвищення шорсткості поверхні при зростанні швидкості різання вище 220 м/хв. після механічної обробки пояснюється появою вібрації при зростанні обертів шпинделя, що і демонструє отримана залежність (крива 1) як на сталі 45, так і на сталі У10.

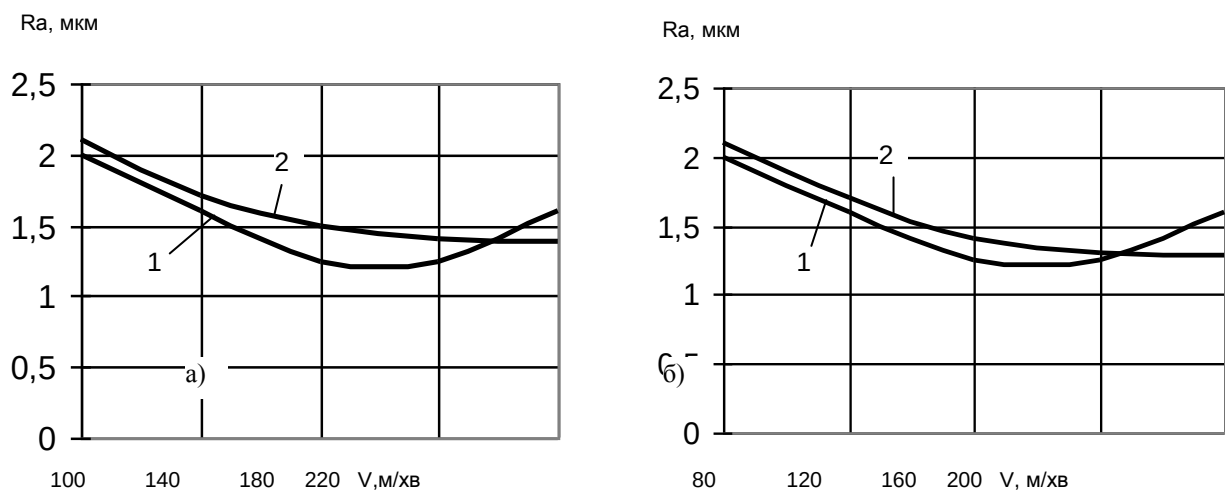


Рисунок 6 – Вплив швидкості різання на шорсткість обробленої поверхні інструментом, оснащеним композитом 10 (вюрцитоподібний нітрид бору) на деталях зі сталі 45 (а) і У 10 (б), які виготовлені комплексним методом: хімічне покриття, режими дифузійного хромування: $T=1050^{\circ}\text{C}$, витримка $\tau=7$ год. (ізотермічна витримка $\tau=1$ год. при $T=800^{\circ}\text{C}$).

Висновки. Запропоновано комплексний метод хімічної обробки і дифузійного хромування для виготовлення та відновлення деталей машин, який полягає у хімічному покритті і наступному дифузійному хромуванні. У результаті на поверхнях деталей отримано зміцнені шари із зовнішньою

композитною зоною інтегральною мікротвердістю 12 ГПа, яка добре працює в умовах інтенсивного зношування.

За результатами механічної обробки деталей, зміцнених комплексним методом, встановлено раціональні режими механічної обробки для отримання оптимальної шорсткості, які підтверджують теоретичні розрахунки: подачу $S = 0,065$ мм/об; глибину різання $t = 0,05$ мм; швидкість різання: 150 – 200 м/хв.

Список літератури: 1. *Полевой С.Н., Евдокимов В.Д.* Упрочнение металлов. – М.: Машиностроение, 1986. – 320с. 2. *Дроздов Ю.Н. Усов С.В.* Использование комбинированных технологических методов для повышения износостойкости деталей машин // Вестн. машиностр.– 1985.– №10.– С.9-11. 3. *Пашечко М.И., Голубец В.М., Чернец М.В.* Формирование и фрикционная стойкость эвтектических покрытий. – Киев: Наук.думка, 1993. – 344с. 4. Патент України № 10751 А від 25.12.96. Спосіб одержання композиційних сульфідно-хромових покриттів. *Слинь І.Г., Березанська В.І.* 5. *Клименко С.А., Мельничук Ю.О., Встовський Г.В.* Фрактальна параметризація структури матеріалів, їх оброблюваність різанням та зносостійкість різального інструменту. –Київ: ІНМ ім. В.М. Бакуля, 2009. – 172 с. 6. Сверхтвердые материалы. Получение и применение: В 6-ти томах. Т. 5. Обработка материалов лезвийным инструментом. Монография. Под редакцией проф. док. техн. наук С.А. Клименко. Киев – 2006. – 317 с. (Усл. печ. л. 25,48). 7. *Н.В. Новиков, Ю.О. Мельничук, С.А. Клименко.* Технологічне управління станом поверхневого шару у процесі точіння покриттів з аморфно-кристалічною структурою. / Режим доступу до ресурсу: http://www.nbuv.gov.ua/portal/natural/Stvm/2008_1/articles%5C10.htm 8. *Ю.А. Мельничук.* Опыт высокоэффективной лезвийной обработки инструментом, оснащенным ПНТМ на основе КНБ и алмаза. // Сучасні процеси механічної обробки інструментами з НТМ та якість поверхні деталей машин. Збірник наукових праць. – Київ. – 2009. – 272 с. 9. Пат. №47261 А Україна, МПК C23C10/02. Спосіб отримання комбінованого покриття поверхонь деталей пар тертя із залізовуглецевих сплавів / *Стецьків О.П., Манько О.В., Стецько А.Є.*, -2001096617; Заявл. 27.09.2001, Опубл. 17.06.2002; Бюл. №6 –3 с. 10. *Ящерицын П.И. и др.* Теория резания. Физические и тепловые процессы в технологических системах: Учеб. Для вузов / П.И. Ящерицын, М.Л. Еременко, Е.Э. Фельдштейн. – Мн.: Выш. шк., 1990. – 512 с.: ил. 11. *Суслов А.Г.* Качество поверхностного слоя деталей машин. – М.:Машиностроение, 2000. – 320с. 12. *Голубец В.М., Шахбазов Я.О., Стецько А.Є.* Технологічне забезпечення якості поверхонь деталей машин відновлених методом хімічного оброблення і дифузійного хромування // Машинознавство. – Львів, 2009.–№6. – С 29-33.

Г.М. ТРИЩ, С.И. КОРОБКО, Харьков, Украина

ПРОЦЕССНЫЙ ПОДХОД В УПРАВЛЕНИИ КАЧЕСТВОМ

У статті розглядається особливості системи управління якістю й визначені її основні властивості. Пропонуються ознаки класифікації процесів. Запропоновано структуру інформаційних взаємозв'язків між процесами.

В статье рассматриваются особенности системы управления качеством и определены ее основные свойства. Предлагаются признаки классификации процессов. Предложена структура информационных взаимосвязей между процессами.

In the article examined the feature of control system by quality and certain it basic properties. The signs of classification of processes are offered. The structure of informative intercommunications is offered between processes

Введение. Современная экономика не может эффективно развиваться без наличия и функционирования систем управления качеством предприятий и организаций, так как высокое качество продукции и услуг является приоритетным в условиях современного рынка. Обеспечение высокого качества возможно за счет разработки, внедрения и постоянного совершенствования систем управления качеством, соответствующим требованиям международных стандартов серии ISO серии 9000:2000 (СУК), причем, эта система должна быть эффективной и результативной, в противном случае, внедрение СУК не позволит обеспечить необходимого качества продукции и услуг. Другими словами, необходимо измерять качество самой СУК.

Получить адекватную числовую характеристику качества СУК в целом в виде функциональной зависимости от множества ее характеристик пока не удавалось никому. Это объясняется тем, что все показатели ее качества не поддаются инструментальному измерению и оцениваются экспертным путем. Поэтому главной задачей научных исследований является разработка комплексной оценки СУК с целью принятия управленческих решений на основании полученных количественных данных о показателях ее качества.

В задачу исследований входит: 1) выявление особенностей системы управления качеством, как системы; 2) разработка классификации процессов СУК; 3) выявление закономерностей и видов информационных связей между элементами СУК, позволяющих оценивать ее количественными методами.

1. Особенности системы управления качеством, как системы. Система управления качеством, как объект исследования, имеет ряд особенностей, учет которых определяет методологический подход исследования. К ним относятся: 1) всеобщий характер, так как все

предприятия имеют СУК, независимо от их размеров, отраслевой принадлежности, профиля, характера деятельности и т.д.; 2) динамический характер развития и многообразие форм построения также делает ее сложным объектом исследования; 3) неопределенность содержания и поведения; 4) вероятностный характер развития; 5) сложная структура; 6) превалирование качественных, а не количественных характеристик в ее оценке; 7) опосредованное влияние на конечные результаты деятельности организации; 8) влияние на нее в большей степени субъективных, а не объективных факторов; и т.д.

Одна и та же СУК может состоять из различного числа элементов, а сами элементы могут быть разнокачественными и по-разному воздействовать между собой и с процессом производства. По-разному может быть организован процесс управленческой деятельности, процессы принятия решения, сбор и переработка информации; в условиях различной управленческой деятельности могут использоваться различные технические средства, применяться те или иные методы менеджмента. Один и тот же орган управления может иметь различную численность работников, неодинаковое соотношение руководителей и подчиненных, старших и рядовых специалистов и других категорий управленческих работников. Кроме того, каждое из подразделений менеджмента в рамках одной системы могут нести различную ответственность за конечные результаты своей деятельности и оказывать разное влияние на ход процессов управления производством. При этом они могут отличаться сложностью выполняемых функций, потреблять различное количество ресурсов, одни и те же управленческие должности могут быть замещены работниками с различным уровнем рабочего потенциала и общего специального образования, стажа работы и тому подобное. Каждый из индивидов обладает способностями, влияющими на отношение к своим обязанностям.

Эти способности могут реализоваться с различной полнотой в зависимости от правильности подбора, расстановки и повышении квалификации кадров управления. Кроме того, различные управленческие должности отличаются сложностью служебных обязанностей, ответственностью, размером оплаты за их исполнение и другими характеристиками. Иначе говоря, для получения правильного и полного представления о системе менеджмента в организации необходимо оценку качества СУК дополнить оценкой целого ряда параметров, характеризующих особенности, факторы, условия, в которых осуществляется управленческая деятельность.

Эти факторы, особенности и условия отражаются по большей части в основных элементах системы управления. Как уже определялось, к основным элементам системы управления можно отнести функции,

принятые в системе методы, структуру, материально-техническое и информационное обеспечение. Таким образом, по нашему мнению, исследование СУК должно включать в себя оценку качества ее основных элементов – процессов, то есть, общий показатель качества системы предприятия формируется через оценки качества ее процессов.

2. Классификация процессов СУК. Процессный подход есть одним из восьми принципов управления качеством, суть которого состоит в том, что желательного результата достигают эффективнее, если деятельностью и связанными с ней ресурсами управляют как процессом. При использовании процессного подхода в системе управления качеством, сам процесс становится регулятором качества составляющих ее процедур. Определение процессов, их анализ и улучшение дает возможность повысить конкурентоспособность организации и эффективность ее деятельности. Основными преимуществами такого подхода является возможность проведения оптимизации как самых процессов (с точки зрения их строения, синхронизации, взаимосогласованности), так и ресурсов, которые используются в процессах; особенно это касается человеческих ресурсов.

Так как в системе управления качеством элементарным объектом является процесс, то для оценки системы управления качеством необходимо оценить качество процессов, для чего необходимо их классифицировать. Как известно, любая классификация направлена на снижение затрат производства, повышение качества и производительности. Признаками классификации процессов могут быть: процессы относительно заказчика; процессы относительно продукции; процессы за уровнем детализации, процессы по структуре.

Процессы относительно заказчика разделяют по таким видам:

1) внешние - процессы, выходы (результаты) которых используют заказчики и заинтересованные стороны (акционеры, банки, налоговые органы и др.), например: доставка продукции заказчику; гарантийное обслуживание; продажа продукции и др.

2) внутренние - процессы, выходы (результаты) которых используют функциональные подразделения организации, например: проектирование; разработка внутренней документации и др. Большинство процессов системы управления качеством, которые описаны в разд. 4-8 стандарта ДСТУ ISO 9001 являются внутренними.

Процессы относительно продукции разделяют по таким видам:

1) основные - процессы производства, сбыта и снабжение, а также все процессы, которые оказывают непосредственное влияние на качество конечной продукции, добавляют ей ценности, т.е. маркетинг, закупка, производство, хранение, снабжение и сервисное обслуживание продукции. В системе управления качеством к основным процессам относят составные

процесса "Выпуск продукции", которые описаны в разд. 7 стандарта ДСТУ ISO 9001;

2) вспомогательные - процессы, которые непосредственно не влияют на качество конечной продукции и не добавляют ей ценности, но они обеспечивают возможность реализации основных процессов и увеличивают стоимость продукции. Это- процессы обеспечения: человеческими ресурсами; документацией; инфраструктурой; производственной средой;

3) процессы управления - процессы, которые непосредственно не влияют (как и вспомогательные) на качество конечной продукции и не добавляют ей ценности, но обеспечивают четкую последовательность выполнения основных процессов и увеличивают стоимость продукции. К ним относят процессы, связанные с контролем, анализом и улучшением продукции и производства. В системе управления качеством к процессам управления относят "Ответственность руководства" и "Измерение, анализ и улучшение", которые описаны в разд. 5 и 8 стандарта ДСТУ ISO 9001.

Процессы за уровнем детализации разделяют по таким видам:

Процессы высшего уровня - это процессы, которые содержат несколько детальных процессов (подпроцессов), что, в свою очередь, содержат элементарные операции. Примером процесса высшего уровня может быть процесс закупки, который содержит такие детальные процессы, как планирование закупки, выбор поставщиков, заключение договора, получение сырья и материалов, которые закупили, и их проверка. В свою очередь, детальный процесс заключение договора содержит такие элементарные процессы, как составление проекта договора, ознакомление с ним, согласование договора и его подписание. Количество уровней декомпозиции процессов определяется задачами проекту и не может превышать четырех уровней [1].

Процессы по структуре могут быть:

Последовательная структура (рис. 1а), где выход одного процесса является входом следующего.

Сходящаяся структура (рис.1б), где выходы многих процессов могут являться входом одного.

Расходящаяся структура (рис.1в), где выходы одного процесса могут быть входами многих.

Сходящаяся-расходящаяся структура (рис.1г), где выходы многих процессов могут являться входом одного и, наоборот, выходы одного процесса могут быть входами многих.

Реверсная структура (рис.1д), где выход последующего процесса является входом предыдущего.

Действующая СУК может принадлежать к одному из указанных типов структур, а, зачастую, состоит из соединений всех предложенных вариантов.

Для применения квалиметрических методов оценки СУК недостаточно иметь количественные значения показателей качества процессов, так как при их объединении система приобретает новые свойства. Такое свойство системы называется эмерджентностью. Эмерджентность - это появление новых качеств, которые не присущи элементам, которые составляют систему. Каждая система является совокупностью определенных частей, определенных элементов. Особенностью является то, что в результате объединения нескольких элементов и образование системы появляются новые свойства, которых не имеет ни один элемент к созданию системы. Эмерджентность системы может характеризовать степень ее организованности. Чем больше характеристики системы отличаются от характеристик элементов, из которых она создана, тем более организованной есть система. Величина эмерджентности не имеет числового выражения, и ее характеристика может быть только качественной [2].

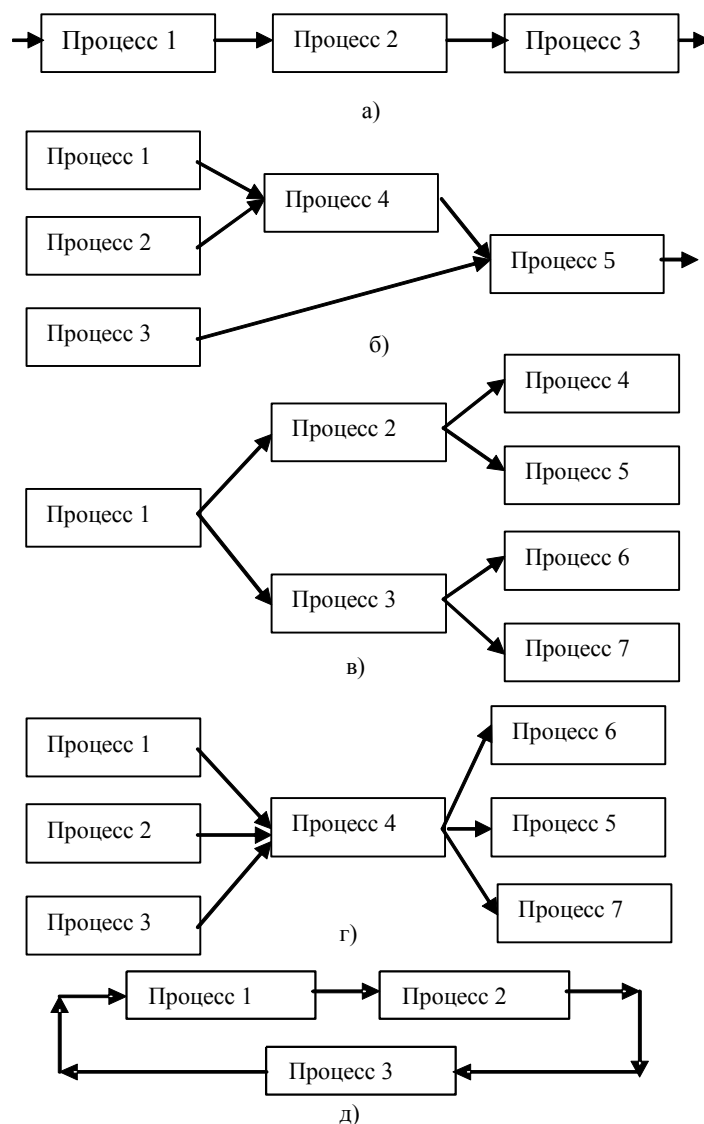


Рисунок 1 – Структуры процессов

Поэтому, для оценки качества СУК необходимо определить структуру информационных взаимосвязей между процессами (моделирование процессных цепей). Структура информационных взаимосвязей между процессами может быть трех типов: кольцевая (рис. 2а), цепная (рис. 2б) и цельная (рис. 2в).

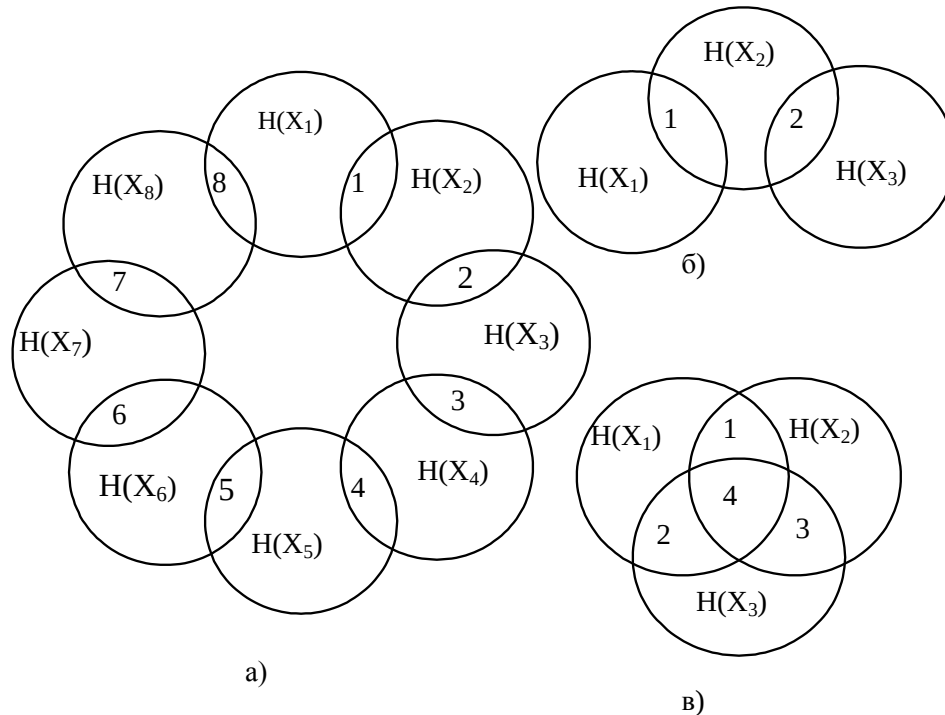


Рисунок 2 – Типы структур информационных взаимосвязей между процессами

Кольцевую структуру информационных связей имеют процессы жизненного цикла продукции, цепная структура присуща вспомогательным процессам а цельная – обязательным. Все остальные возможные взаимосвязи между процессами СУК имеют одну из предлагаемых структур или их комбинацию.

Выводы: 1. Выявлены особенности системы управления качеством и определены ее основные свойства. Общий показатель качества системы предприятия формируется через оценки качества ее процессов. 2. Признаками классификации процессов могут быть: процессы относительно заказчика; процессы относительно продукции; процессы за уровнем детализации; процессы по структуре. 3. Для оценки качества СУК необходимо определить структуру информационных взаимосвязей между процессами. Структура информационных взаимосвязей между процессами может быть трех типов: кольцевая, цепная и цельная.

Список литературы: 1. Сорока К.О. Основы теорії систем і системного аналізу: Навч. посібник. - Х.: Тимченко, 2005. - 288 с. 2. Колесников Л.А. Основы теории системного подхода. - К.: Наук, думка, 1988.- 176 с.

УДК 621. 923.1:66/68

Л.П. КАЛАФАТОВА, д-р техн. наук, *С.А.ПОЕЗД*, Донецьк, Україна

МИНИМИЗАЦИЯ СЕБЕСТОИМОСТИ ШЛИФОВАНИЯ СИТАЛЛОВ

Розроблена методика визначення оптимальних режимів шліфування крихких неметалевих матеріалів. Дослідження проводилися на прикладі крихкого матеріалу – ситала АС-418. При вирішенні задачі оптимізації процесу шліфування ситалів у якості критерію прийнято мінімум технологічної собівартості обробки. Були визначені цільова функція і технічні обмеження, які враховували вплив параметрів процесу шліфування на стан елементів технологічної системи, в тому числі на дефектність поверхні, що формується. Використання методики при проектуванні технологічних процесів дозволяє забезпечити мінімум собівартості обробки виробів при забезпеченні їх якості.

Разработана методика определения оптимальных режимов шлифования хрупких неметаллических материалов. Исследования проводились на примере хрупкого материала – ситалла АС-418. При решении задачи оптимизации процесса шлифования ситаллов в качестве критерия был принят минимум технологической себестоимости обработки. Были определены целевая функция и технические ограничения, которые учитывали влияние параметров процесса шлифования на состояние элементов технологической системы, в том числе на дефектность формируемой поверхности. Использование методики при проектировании технологических процессов позволяет обеспечить минимум себестоимости обработки изделий при обеспечении их качества.

The method for determining the optimum parameters for grinding of brittle nonmetallic materials are presented. Studies were conducted on the example of brittle material - sitall AS-418. In solving the problem of optimizing the process of grinding of ceramics as a criterion was adopted by the minimum of technological cost of machining. Were defined objective function and the technical limitations that take into account the influence of process parameters on the grinding condition of the elements of a technological system, including defects formed surface. Using the methodology in the design process allows for a minimum cost of processing of products while ensuring their quality.

Введение. Тенденция вытеснения металлических деталей и элементов конструкций с заменой их более дешевыми и функциональными неметаллическими материалами, к которым относится стеклокерамика (ситаллы), наблюдается во всех отраслях народного хозяйства. Точности размеров и качества поверхностей этих изделий, необходимых для использования их в качестве деталей машин и ответственных конструкций,

можно достичь лишь с применением механической обработки (алмазного шлифования). Однако подобная обработка сопровождается силовыми и температурными нагрузками на обрабатываемый материал и, в результате, развитием дефектного слоя - системы трещин, каждая из которых служит концентратором напряжений. Наличие дефектности значительно снижает качество обработанной поверхности и может вызвать досрочное разрушение деталей при эксплуатации. Необходимость удаления дефектного слоя на трудоемких чистовых операциях алмазного шлифования и последующей экологически вредной и затратной операции химического травления и ионного упрочнения существенно увеличивает конечную стоимость изделия. Построение технологического процесса механической обработки ситаллов, в том числе и выбор режимов резания, при которых качество сформированной поверхности обеспечивается при минимальных затратах (при минимуме технологической себестоимости) - важная задача, решаемая на этапе проектирования процесса обработки. Решению этой задачи посвящено большое количество исследований.

В работе [1] при решении задачи оптимизации предложена и часто авторами используется следующая последовательность назначения режимов обработки: назначение необходимой глубины резания t , как правило, обусловленной необходимостью снятия заданного припуска (припуск $h = t$); определение величины продольной подачи стола s (схема плоского шлифования), исходя из требований к шероховатости обрабатываемой поверхности; определение скорости резания v (частоты вращения шпинделя станка n), исходя из обеспечения качества формируемой поверхности и возможностей оборудования.

Такая последовательность назначения режимов резания позволяет снизить стоимость обработки, однако, подобный подход не позволяет найти оптимальное сочетание режимов, исходя из достижения экстремума выбранного критерия оптимизации, что возможно только при одновременном их варьировании.

Часто авторы при обосновании целесообразности новых, предложенных ими особенностей обработки, осуществляют расчет технологической себестоимости, сравнивая между собой стоимости предлагаемого и базового вариантов обработки. В связи с необходимостью акцентирования внимания на предлагаемых особенностях протекания процесса, обычно учитываются не все внешние влияния и ограничения. Не изменяющиеся для рассматриваемых вариантов обработки статьи затрат

опускаются. Подобный подход также не обеспечивает точного решения задачи оптимизации.

Работы [2, 3, 4, 5], большая часть которых датирована 60-80 годами XX столетия, посвящены решению задачи оптимизации механической обработки при одновременном варьировании режимами обработки. Учитывая низкие возможности вычислительной техники того периода, при решении использовался ряд упрощений, что позволяло при логарифмировании полученных сложных математических зависимостей привести их к линейному виду и решать задачу с применением методов линейного программирования. В работе [2] в качестве критерия оптимизации принят минимум себестоимости, но при этом оговаривается, что минимальная себестоимость соответствует минимальному времени обработки, и в качестве целевой функции при решении задачи оптимизации используется зависимость $n \cdot s \Rightarrow \max$. Решения ограничиваются варьированием двух параметров (чаще всего глубина резания принимается равной величине удаляемого припуска).

Труды Г. К. Горанского [4] посвящены разработке алгоритмов и программ определения оптимальных режимов резания и технически обоснованных расчетных норм времени при работе на металлорежущих станках. Автором рассмотрены процессы точения, сверления, рассверливания, зенкерования, развертывания, нарезания резьбы, фрезерования, зубо- и шлицефрезерования, зубодолбления и шлифования. В литературе приведены универсальные алгоритмы расчета оптимальных режимов обработки металлов и вариантов разбиения припуска по операциям (переходам) с последующей реализацией программ на ЭВМ «Минск-2». Однако, в рассматриваемых работах, определение целевой функции и ограничений осуществлялось для операции точения металлов, после чего построенная математическая модель «расширялась», путем приспособления ее к описанию процессов сверления, затем – фрезерования и, в последнюю очередь, – шлифования. Хотя известно, что при лезвийной и абразивной обработках физика процесса резания различна.

Оптимизация режимов резания – сложная математическая задача, и для ее решения в полном объеме требуются сложные математические вычисления. С развитием и широким внедрением в практическое использование современной компьютерной техники целесообразно подобные задачи решать без использования упрощений (например, линеаризации), с учетом максимально возможного числа ограничений. При этом одним из важнейших факторов, определяющих достоверность

полученных решений, является учет особенностей механической обработки, прежде всего, шлифования хрупких неметаллических материалов, так как приведенные в литературе результаты исследований по этим вопросам относятся преимущественно к обработке металлов.

Ситаллы – хрупкие неметаллические материалы, разновидность конструкционной керамики, имеющие свои особенности процесса резания, существенно отличающиеся от обработки металлов. Это не позволяет при проектировании технологических процессов использовать методики, разработанные ранее для металлов. При нахождении режимов, исходя из обеспечения минимума технологической себестоимости обработки изделий, необходимо учитывать их влияние на условия протекания, параметры процесса резания, состояние элементов технологической системы, в том числе и на качество формируемой поверхности. Учитывая сказанное, необходимо отметить и в последствии учесть:

- влияние режимов обработки на стойкость алмазного инструмента и, соответственно, на себестоимость обработки;
- влияние режимов обработки на линейный износ круга в процессе обработки и, как следствие, на его износ при правке;
- влияние режимов обработки, режущей способности инструмента и свойств применяемых СОТС на силы резания;
- влияние сил резания на дефектность формируемой поверхности, то есть на качество обработки;
- влияние режимов обработки, режущей способности инструмента и свойств применяемых СОТС на температуру в зоне шлифования и на глубину проникновения температурных полей;
- влияние температуры, сопровождающей процесс резания, на дефектность сформированной поверхности;
- влияние режимов на шероховатость обработанной поверхности;
- возможность реализовать найденные оптимальные режимы обработки на используемом оборудовании (диапазоны допускаемых оборудованием режимов резания, исходя из мощности двигателей главного и вспомогательного движений).

Цель статьи заключается в разработке методики нахождения *оптимальных* режимов шлифования хрупких неметаллических материалов (ХМН) на примере ситаллов, позволяющих достичь минимума технологической себестоимости обработки изделий при учете особенностей протекания процесса обработки, перечисленных выше.

Основная часть. Проведенные исследования, связанные с изучением особенностей обработки ХНМ (ситаллов), и анализ результатов, полученных другими авторами [6, 7, 8, 9], позволил определить

приведенные ниже целевую функцию (1), ее составляющие (2, 3, 4, 5, 6) и ограничения (7). Рассматривался процесс плоского алмазного шлифования ситаллов периферией круга по жесткой схеме.

Целевая функция технологической себестоимости $C_{T_{\text{шт}}}$ изделий из ситаллов, выраженная через варьируемые параметры (v, s, t) , имеет нелинейный вид:

$$C_{T_{\text{шт}}}(v, s, t) = \frac{L_{\partial} K_{\Pi}}{1000 \cdot s} \left(c_{cm} k_t + c_{cm} + (c_{np} + c_{cm}) \cdot \frac{t_{np}}{T} \right) + \frac{C_u}{h_{kp}} \left[J_w + J_{np} t_{np} \left(\frac{t_m}{T} \right) \right] \rightarrow \min, (1)$$

где $J_w = f(v, s, t)$ - линейный износ круга за время обработки; $t_m = f(s)$ - машинное время одного перехода; $T = f(v, s, t)$ - стойкость алмазного

круга; $K_{\Pi} = \left\lceil \frac{B_{\partial}}{B_k} \right\rceil + 1$ - количество шагов поперечной подачи, округленное в

большую сторону; B_{∂} - ширина шлифования; B_k - ширина круга; L_{∂} - длина шлифуемой поверхности; c_{cm} - стоимость одной минуты эксплуатации станка с учетом зарплаты рабочего; c_{np} - стоимость одной минуты правки круга; t_{np} - время правки круга; $k_t = \frac{t_x}{t_m}$ - коэффициент

простоя оборудования; t_x - суммарное время простоя, которое приходится на одну деталь; J_{np} - линейный износ круга за единицу времени правки, отнесенный к одной детали, зависит от режима и способа правки; h_{kp} - толщина алмазоносного слоя круга; C_u - начальная стоимость круга.

Зависимость стойкости алмазного инструмента от режимов обработки и характеристик инструмента, найденная экспериментально [9], при решении задачи оптимизации используется как составляющая целевой функции, и имеет вид

$$T(v, s, t) = \frac{(\ln Q_{\text{дон}} - \ln(0.43 + 0.0014 \cdot d_z) - \ln(0.17 + 0.025v))^2}{(-0.0227 - 0.00074v - 0.0044s - 0.0045t)^2 \cdot (6 - 0.022d_z)^2 \cdot 6t \cdot s} (2),$$

где $Q_{\text{дон}}$ - допустимое значение коэффициента режущей способности круга; d_z - средний размер зерна.

Зависимость линейного износа круга от объема сошлифованного материала W [9] так же учтена в целевой функции и имеет вид:

$$J_w(v, s, t) = 3.52 \cdot 10^{-4} \cdot e^{-0.0058d_z} \left(0.004 \cdot s^{4.41} \cdot t^{(6.83-3.92\ln s)} + 4.26 \cdot v^{-1.46} \cdot t^{0.56} \cdot W / B_k \right) (3)$$

Машинное время при шлифовании детали длиной L_d :

$$t_m(s) = \frac{(L_d + \Delta L) K_{II}}{1000 \cdot s}, \quad (4)$$

где ΔL - длина врезания и перебега круга соответственно.

То есть, влияние режимов обработки на стойкость алмазного инструмента и на его линейный износ в процессе обработки, а также износ инструмента при правке учтены в целевой функции. Остальные требования, учет которых необходим для правильного описания технологического процесса и обеспечения качества изделий при решении задачи оптимизации, выступали в роли ограничений. Они представлены ниже.

Влияние режимов и условий обработки на составляющие силы резания учитывалось согласно зависимостям, полученным экспериментально [10], и имеющим вид:

$$\begin{aligned} P_z &= C_{Pz} \cdot v^\alpha \cdot s^\beta \cdot t^\gamma \leq P_{\text{дон}Pz}, \\ P_y &= C_{Py} \cdot v^{\alpha'} \cdot s^{\beta'} \cdot t^{\gamma'} \leq P_{\text{дон}Py}, \end{aligned} \quad (5)$$

где P_z, P_y - тангенциальная и нормальная составляющие силы резания; $C_{Pz}, C_{Py}, \alpha, \beta, \gamma, \alpha', \beta', \gamma'$ - соответственно коэффициенты и показатели степени, полученные экспериментально, и зависящие от зернистости круга dz , свойств применяемой СОТС и режущей способности инструмента; $P_{\text{дон}Pz}, P_{\text{дон}Py}$ - допустимые, исходя из условий обработки значения тангенциальной и нормальной составляющих силы резания.

Зависимости, позволившие оценить влияние режимов и условий обработки на температуру резания, подобно уравнениям (5), получены экспериментально, и имеют коэффициенты, зависящие от зернистости круга dz , свойств применяемой СОТС и режущей способности инструмента.

Согласно результатам исследований [11], уровень температуры, возникающей в зоне обработки при шлифовании ситаллов в нормальных условиях, при подаче СОТС в зону обработки в достаточном количестве, не оказывает существенного влияния на развитие дефектности. Большее влияние оказывает наличие в зоне обработки СОТС, обладающих повышенными диспергирующими свойствами. Поэтому влияние температуры резания на дефектность сформированной поверхности в качестве ограничения при решении задачи оптимизации не учитывалось.

В результате исследований зависимости R_a от v, s, t [9] оказалось, что при шлифовании ситаллов режимы шлифования практически не

оказывают влияния на шероховатость обработанной поверхности, и при решении задачи оптимизации данное ограничение так же не учитывалось.

Специфика обработки шлифованием ХНМ и, в частности, ситаллов заключается в формировании и развитии дефектов (микротрещин) при любом механическом воздействии на материал. Максимальное влияние на развитие дефектного слоя, как было установлено [8, 9], оказывает нормальная составляющая силы резания P_y , увеличение которой усугубляет распространение нарушенного обработкой дефектного слоя. Исходя из сказанного, ограничение, позволяющее учитывать влияние условий обработки на размеры возникающих обработочных дефектов и глубину их проникновения, выглядит следующим образом:

$$D = f(P_y) \leq D_{\text{дон}}, \quad (6)$$

где, D - средний размер обработочных дефектов, проникающих на определенную глубину при соответствующих условиях обработки; $D_{\text{дон}}$ - допустимый, исходя из соблюдения требований качества обработки, средний размер обработочных дефектов на заданной глубине.

В свою очередь, $P_y = f(t, s, v)$. Однако величину удаляемого при шлифовании слоя материала необходимо выбирать, исходя из глубины, на которой размеры обработочных дефектов достигают допустимых размеров, и для расчетов необходимо использовать функцию:

$$h_d = f(D),$$

где h_d - глубина проникновения дефектов, по размерам превышающих допустимые.

Величина (переменная) h_d отслеживает минимальную глубину, ниже которой не встречаются обработочные дефекты с величиной усредненного единичного дефекта, большего допустимого размера. Максимально допустимый средний размер дефектов принимается отдельно для каждого конкретного случая, исходя из требований к качеству обработанной поверхности и условий последующей эксплуатации обрабатываемого изделия.

На практике глубину проникновения дефектного слоя и размеры дефектов, вызванных обработкой, определяли методом капиллярной люминесцентной дефектоскопии в сочетании с послойным химическим травлением образцов с помощью растворов концентрированных кислот [8]. При этом глубина травления h_{mp} соответствовала глубине залегания исследуемого дефектного слоя h_d , то есть, можно считать, что $h_{mp} = h_d$. На каждом уровне травления картина дефектности и величина дефектов

обсчитывалась и оценивалась на ЭВМ с помощью специально разработанной программы визуализации дефектной поверхности.

На рис. 1 приведены зависимости $D = f(P_y)$, полученные экспериментально [8] и характеризующие дефектную поверхность при шлифовании ситалла инструментом зернистостью 125/100.

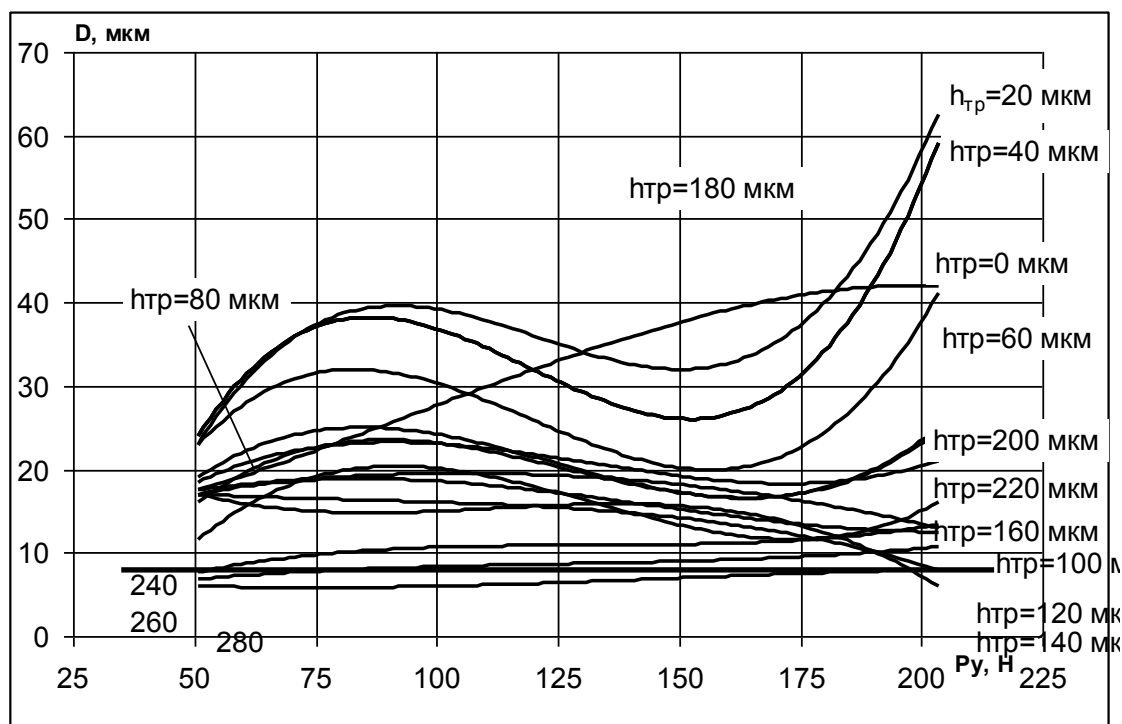


Рисунок 1 – Зависимость величины усредненного единичного дефекта D от значений силы P_y на разных уровнях травления ($h_{тр}$) при шлифовании технического ситалла АС-418 алмазным кругом АС6 125/100 – 4 – М2-01[8]

Как видно из графиков, представленных на рис. 1, для конкретного случая на глубине 100 мкм дефектность достигает некоторого «локально наибольшего» значения, и при дальнейшем заглублении уменьшается, но незначительно. Кроме того, можно видеть, что сила резания $P_y = 175$ мкм является в некотором роде оптимальной, с точки зрения развития дефектности. Об этом можно судить по стабильно низкому уровню размеров дефектов в широком диапазоне глубин $h_{мп} = 60 \dots 220$ мкм.

Учитывая, что уровень нормальной составляющей силы шлифования зависит от режима обработки, характеристик и конструкции режущего инструмента, его режущей способности, схемы шлифования, состава и свойств смазочно-охлаждающих технологических сред и др., можно предварительно определить рациональные, с точки зрения качества шлифованной поверхности, условия обработки.

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{\min cm} \geq v \geq v_{\max cm}; \\ s_{\min cm} \geq s \geq s_{\max cm}; \\ N_V = \frac{P_z \cdot v}{1000} \leq N_{V\partial}; \\ N_S = \frac{P_z \cdot s}{1000 \cdot 60} \leq N_{S\partial}; \\ Pz = C_{Pz} \cdot v^\alpha \cdot s^\beta \cdot t^\gamma \leq P_{\partial on Pz}, \quad C_{Pz}, \alpha, \beta, \gamma = f(dz, COTC); \\ Py = C_{Py} \cdot v^{\alpha 1} \cdot s^{\beta 1} \cdot t^{\gamma 1} \leq P_{\partial on Py}, \quad C_{Py}, \alpha 1, \beta 1, \gamma 1 = f(dz, COTC); \\ D = f(P_y) \leq D_{\partial on}; \\ \theta = C_\theta \cdot v^\alpha \cdot s^\beta \cdot t^\gamma \leq \theta_{\partial on}, \quad C_\theta, \alpha, \beta, \gamma = f(COTC) \end{array} \right. \quad (7)$$

Как видно из приведенных зависимостей, для нахождения оптимальных режимов обработки, обеспечивающих достижение минимума себестоимости при обеспечении требуемого качества изделий, необходимо осуществить решение нелинейного уравнения (1) – целевой функции, при соблюдении выполнения неравенств (7) – технических ограничений. Это кусочно-гладкая функция, для которой аналитическое выражение построить невозможно.

Решение такой задачи возможно лишь с помощью методов нелинейного программирования. При решении задачи использовались: метод штрафных функций, метод деформируемого многогранника и метод поиска по сетке [12].

С помощью метода штрафных функций задача с ограничениями сводилась к задаче безусловной оптимизации (без ограничений). Для предотвращения опасности нахождения локального минимума создавалась сетка в предполагаемой области определения функции. После, с помощью метода деформируемого многогранника, находилось решение, исходя из начальных условий каждого узла сетки, и выбиралось наименьшее. Решение задачи оптимизации реализовано в программной среде Delfi 7.0.

В качестве примера рассмотрим наиболее простой вариант расчета оптимальных режимов шлифования при условии удаления припуска величиной 0,3 мм за один проход, то есть $t = 0,3$ мм, при реализации жесткой схемы плоского шлифования ситалла АС-418 периферией круга с характеристикой АС6 125/100 – 4 – М2-01. Известны: начальная стоимость круга; стоимость одной минуты эксплуатации станка; время и стоимость одной минуты правки. При расчете также учитывались мощности приводов главного движения и

движения подачи станка состав и стоимость СОТС. Диапазоны варьирования режимов обработки: $v = 23-50$ м/с; $s = 1,1-6$ м/мин. По дефектности должно выполняться условие: D не более 35 мкм при максимальной глубине залегания $h_{mp} = 75$ мкм.

В результате использования расчетной программы были получены следующие параметры режима шлифования: $v = 45$ м/с, $s = 2,34$ м/мин, $t = 0,3$ мм. Обработка на таких режимах позволяет обеспечить все требования качества при удалении припуска за один проход (рис. 2, кривая *а*). На производстве в подобном случае используются более интенсивные режимы по подаче s , что обеспечивает более высокую производительность на данном переходе. Однако по уровню дефектности (см. рис. 2, кривая *б*) на глубине $h_{mp} = 75$ мкм размеры дефектов превышают заданное условиями эксплуатации изделия значение усредненного единичного дефекта, что делает невозможным удаление припуска величиной 0,3 мм за один проход. Необходимость удаления внесенной дефектности на последующих дополнительных переходах кругом меньшей зернистости и при менее напряженных режимах шлифования в результате удваивает стоимость обработки.

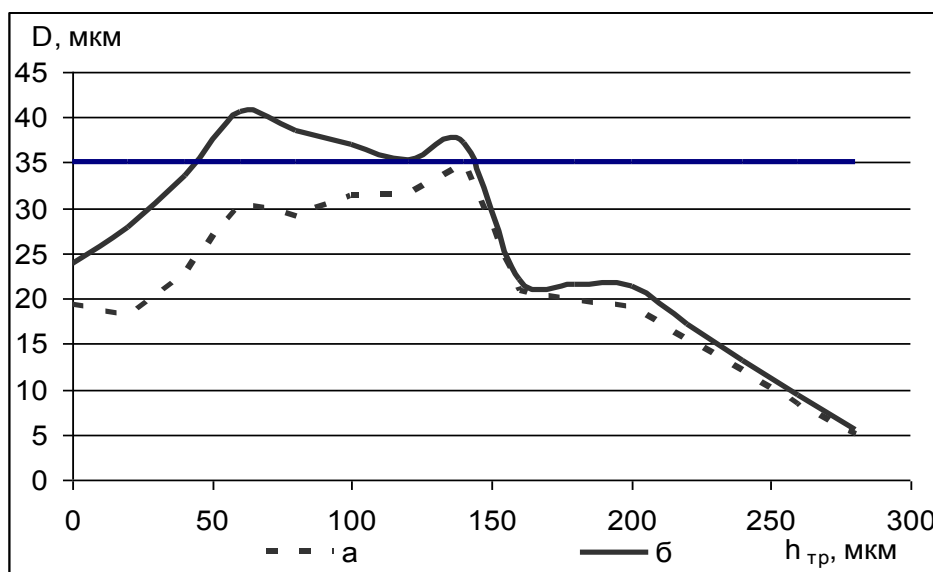


Рисунок 2 – Влияние режимов шлифования ситалла АС-418 на средний размер D и глубину проникновения $h_{тр}$ обработочных дефектов. Обработка с режимами: а - $v = 44,8$ м/с, $s = 2,34$ м/мин, $t = 0,3$ мм; б - $v = 44,8$ м/с, $s = 4,8$ м/мин, $t = 0,3$ мм.

Заключение. Разработанный подход к решению задачи оптимизации при определении режимов шлифования ХНМ имеет важное практическое значение. Положенная в его основу методика определения режимов

шлифования применима при проектировании технологических процессов обработки изделий с использованием широких спектров технологического оборудования и инструментов, позволяя существенно сократить время на проектирование технологического процесса; рационально распределить припуск по его операциям; предварительно оценить уровень затрат по каждому из рассматриваемых вариантов обработки; рассчитать режимы обработки, позволяющие достичь минимума технологической себестоимости при обеспечении требуемого качества изделия.

Список литературы: 1. Горелов В. М. Резание металлов/ Горелов В. М – М.: Машиностроение, 1966.- 207с. 2. Бобров В. Ф. Основы теории резания металлов/ Бобров В. Ф. – М.: Машиностроение, 1975.- 344с. 3. Резников Н. И. Учение о резании металлов / Резников Н. И. – М.: Машиностроение, 1947.- 586с; 4. Горанский Г.К. Автоматизация технического нормирования работ на металлорежущих станках с помощью ЭВМ/ Горанский Г.К., Владимиров Е.В., Ламбин Л.Н. Автоматизация технического нормирования работ на металлорежущих станках с помощью ЭВМ.- М.: Машиностроение, 1970.-224с. 5. Краснятов Н. П. Механическая обработка деталей резанием / Краснятов Н. П, Городецкий Г. Б. Иркутск:Изд-во Иркут. ун-та, 1991. – 44с. 6. Калафатова Л. П. Влияние состава смазочно-охлаждающих технологических сред на тепловые и силовые характеристики процесса шлифования ситаллов / Калафатова Л.П., Поезд С.А. // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Машинобудування і машинознавство». – Донецьк: ДонНТУ. – 2008.- Вип. № 5(139).- С. 30-39. 7. Армарего И. Дж. А., Обработка металлов резанием / Армарего И. Дж. А., Браун Р. Х. :пер. с англ. В. А. Пастунова. – М.: Машиностроение, 1977. 325с. 8. Калафатова Л.П. Технологические основы повышения эффективности обработки и обеспечения качества изделий из технических стекол и ситаллов: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук : спец. 05.02.08 "Технологія машинобудування" / Л.П. Калафатова; Донецький. держ. техн. ун-т. — Донецьк, 2001. — 20 с. 9. Разработка методов обеспечения надежности технологических процессов механической обработки труднообрабатываемых материалов и средств их реализации: отчет о научно-исследовательской работе/ [В.В. Бурмистров, П.Г. Матюха, Л. П. Калафатова и др.] – Донецк: ДонНТУ, 1990. – 85 с. 10. Калафатова Л.П. Влияние режимов обработки на температурные и силовые параметры процесса шлифования ситалла / Калафатова Л.П., Поезд С.А. // Современные технологии в машиностроении: Сб. научн. Статей/Под ред. А.И. Грабченко – Харьков: НТУ «ХПИ», 2007. – С. 43-50. 11. Калафатова Л. П. Влияние охлаждения на температурные и силовые параметры процесса шлифования, а так же на качество поверхности ситаллов при различных режимах резания / Калафатова Л.П., Поезд С.А. // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем. Сборник научных трудов. – Краматорск – Киев, вып. №23, 2008. – С. 194-201. 12. Пантелеев А.В. Методы оптимизации в примерах и задачах / Пантелеев А.В., Летова Т.А. – М: Высшая школа, 2005. – 544с. – ISBN 5-06-004137-9.

А. И. МОМОТ, д-р экон. наук,
Е. В. МИРОШНИЧЕНКО, Донецк, Украина,
А. В. МИХАЦКАЯ, Киев, Украина

СТРУКТУРА И КРИТЕРИИ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА ВУЗА

У даній статті розглянуто актуальна задача розробки єдиної базової моделі системи менеджменту якості (СМЯ) Українських вузів. Запропонований ряд критеріїв і вимог, які можуть бути використані для проведення самооцінки і визначення напрямів для покращення діяльності вузу, а також дозволить вузам підготуватися до зовнішньої перевірки при проведенні атестаційної експертизи.

В данной статье рассмотрена актуальная задача разработки единой базовой модели системы менеджмента качества (СМК) Украинских вузов. Предложен ряд критериев и требований, которые могут быть использованы для проведения самооценки и определения направлений для улучшения деятельности вуза, а также позволят вузам подготовиться к внешней проверке при проведении аттестационной экспертизы.

The actual task of development of single base model of the quality management system (QMS) of the Ukrainian institutes of higher education is considered in this article. The chain of criteria and requirements which can be used for the conducting of self-appraisal and determination of directions for the improvement of the activity of institute of higher education are offered, and also they will allow the institutes of higher education to prepare for external verification during the attestation examination conducting.

Постановка проблеми. В настоящее время в Украине разворачиваются следующие тесно взаимосвязанные между собой процессы:

1) переход к комплексной оценке деятельности вузов, совмещающей процедуры лицензирования, аттестации и государственной аккредитации на базе утвержденного перечня показателей деятельности вузов, включающего, в частности, и показатели наличия и эффективности внутривузовских систем контроля качества образования;

2) усиление конкуренции между вузами на рынке образовательных услуг и рынке трудовых ресурсов;

3) присоединение Украины в мировое образовательное сообщество и Болонский процесс, требующее унификации процессов контроля, обеспечения и гарантии качества предоставляемых образовательных услуг;

4) распространение в вузах страны работ по созданию, внедрению и сертификации внутривузовских систем управления качеством в соответствии с требованиями и рекомендациями международного стандарта ISO 9001:2008 и стандарта IWA 2:2007.

Анализ последних исследований и публикаций. Под системой менеджмента качества вуза понимается система менеджмента для руководства и управления организацией применительно к качеству, т.е. совокупность организационной структуры вуза, документации (внутренних положений, порядков документированных процедур, методических указаний, рабочих инструкций), процессов и ресурсов, необходимых для осуществления общего руководства качеством. Говоря о системе менеджмента качества вуза, необходимо, прежде всего, определить модель, в соответствии с которой она будет строиться. При этом под моделью системы менеджмента качества понимается совокупность принципов, методов, показателей и требований к различным аспектам и процессам деятельности организации, критериев, определяющих уровень совершенства этих процессов и способов их оценки, которые в совокупности определяют все процессы деятельности организации, направленные на достижение требуемых результатов по качеству [9].

При разработке модели и критериев эффективности внутривузовской системы менеджмента качества был проведен анализ отечественного и зарубежного опыта в этой области, включая Россию, страны Европы, США и Австралию:

1. Модель системы менеджмента качества по международному стандарту ISO 9001:2008[1];
2. Модель системы менеджмента качества по стандарту IWA 2:2007 [2];
3. Модель Европейского фонда по менеджменту качества (EFQM) и ее модификации для высшего образования [3];
4. Модель премии конкурса Министерства образования РФ "Внутривузовские системы обеспечения качества подготовки специалистов" 2003 г. [4];
5. Модель Центра исследований политики в области высшего образования (CHEPS) университета Твенте (Нидерланды) [5];
6. Бельгийско-нидерландская модель (HBO Expert Group) [6];
7. Модель национальной американской премии по качеству "Baldrige National Quality Award" в области образования [7];
8. Модель эталонного тестирования для Австралийских университетов [8] и др.

Выделение нерешенных ранее частей общей проблемы. Для определения и стандартизации требований к качеству образовательных услуг актуальна задача разработки единой концепции, базовой модели и методики систем менеджмента качества (СМК) Украинских вузов, согласованных с отечественной и общемировой практикой построения систем обеспечения качества образовательных учреждений.

Формулировка целей статьи. С учетом проведенного анализа исследованных моделей СМК вуза разработана модель с рядом критериев и требований, без которых невозможно адекватно оценить наличие и степень совершенства СМК, но которые содержатся в требованиях стандарта ISO 9001:2008 (ДСТУ ИСО 9001-2009), в том числе:

- внедрение процессного подхода;
- управление документацией;
- построение организационной структуры СМК;
- построение, поддержание и развитие системы измерений и мониторинга;
- планирование рабочих процессов вуза;
- внутренние аудиты, самооценка вуза и его структурных подразделений;
- постоянное улучшение, корректирующие и предупреждающие действия.

Некоторые образовательные организации встречаются с трудностями адаптации требований стандарта ISO 9001. Поэтому IWA 2:2007 «Системы управления качеством. Руководство по внедрению стандарта ISO 9001:2000 в сфере образования», была разработана для решения этих проблем.

IWA 2 написана специалистами для профессионалов в сфере образования. К восьми принципам построения СМК, описанных с помощью образовательного языка, предлагается 4 дополнительных принципа для достижения успеха образовательных организаций:

- установление ценности обучаемого;
- сосредоточенность на социальную значимость;
- гибкость;
- автономия.

IWA 2:2007 содержит два практических дополнения:

А – придает принципам самооценки образовательных организаций инструкции для применения и получения результатов;

В – содержит принципы общепринятых образовательных процессов и усовершенствования их.

Изложение основного материала исследования.

Предлагаемая модель и критерии эффективности внутривузовской системы менеджмента качества могут быть использованы для проведения самооценки и определения направлений для улучшения деятельности вуза, а также позволят вузам подготовиться к внешней проверке при проведении аттестационной экспертизы. Самооценка может проводиться на различных уровнях: на уровне вуза в целом, на уровне факультета, кафедры или структурного подразделения. Оценка системы менеджмента качества вуза может производиться по девяти критериям модели, представленной на рисунке.

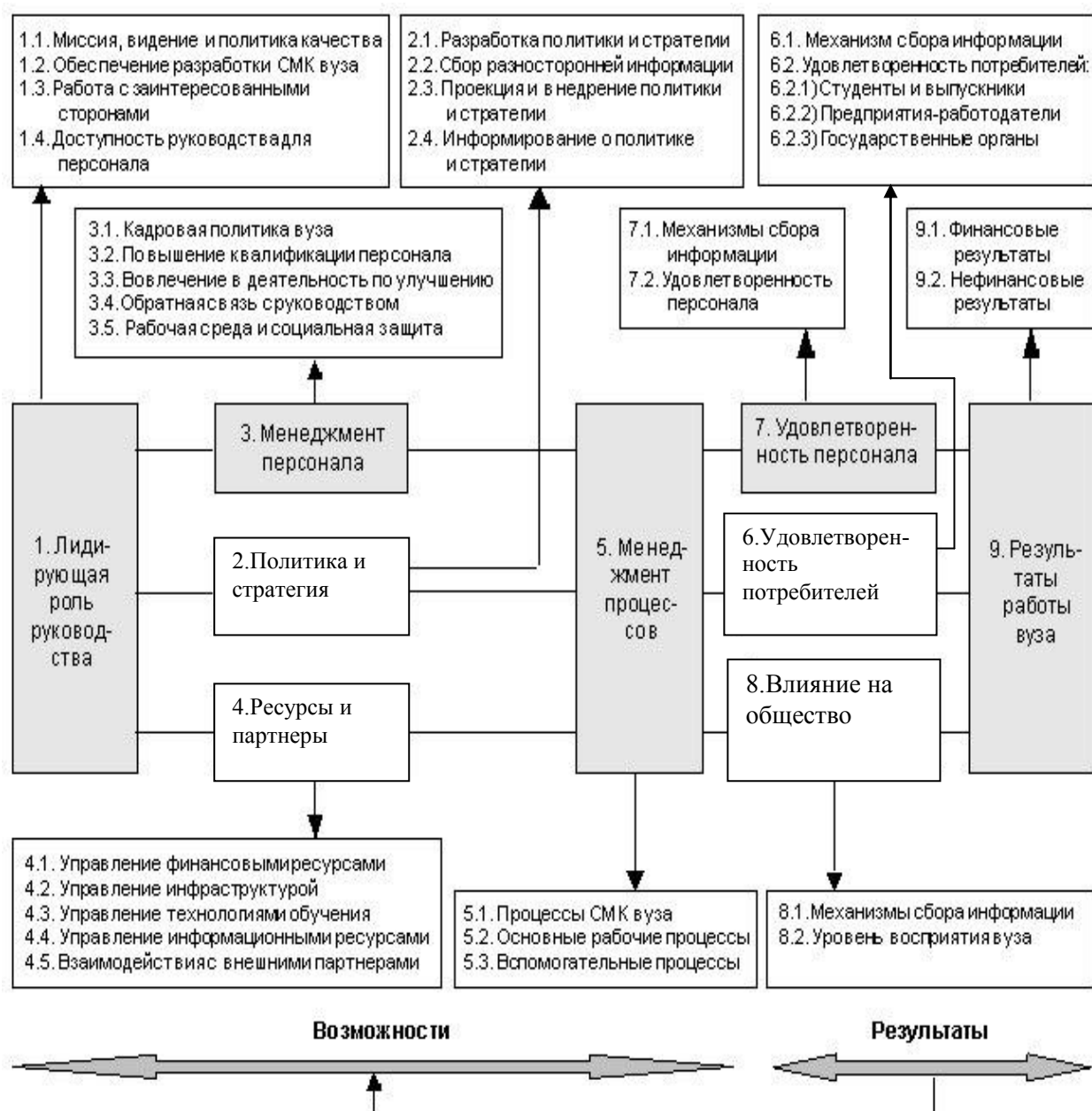


Рисунок – Модель внутривузовской СМК

Таблица 1 – Критерии и подкритерии модели СМК вуза

Критерии	Подкритерии
1. Лидирующая роль руководства	1.1 Личное участие руководства вуза в формировании и развитии миссии, видения, основных ценностей, политики, основных целей и задач в области качества 1.2 Личное участие руководства в обеспечении разработки, внедрения и постоянного совершенствования системы менеджмента качества (СМК) вуза 1.3 Личное участие руководства вуза в работе с внешними заинтересованными сторонами (потребителями, поставщиками, партнерами, представителями общественности и др.) 1.4 Личное участие руководства вуза в обеспечении обратной связи с персоналом для улучшения своей деятельности
2. Политика и стратегия	2.1 Разработка и совершенствование политики и стратегии и степень участия в этих процессах заинтересованных сторон (студентов, персонала вуза, потребителей, поставщиков, партнеров, представителей общественности и др.) 2.2 Механизмы сбора и анализа разносторонней информации о результативности и эффективности функционирования вуза при формировании его политики и стратегии 2.3 Механизмы проекции внедрения политики и стратегии на все уровни управления, структурные подразделения и ключевые процессы вуза 2.4 Механизмы информирования персонала вуза и студентов о проводимой политике и стратегии
3. Менеджмент персонала	3.1 Кадровая политика и принципы управления развитием персонала. Характеристика научно педагогических работников (НПР): -общее количество ставок по штатному расписанию; -количество преподавателей (за последние 5 лет) принятых и уволенных по разным причинам; -численность НПР; - количество совместителей; - педагогический стаж НПР; - количество НПР, которые повысили квалификацию за последние 5 лет; - штатные НПР, которые занимаются усовершенствованием учебно-методического обеспечения, научными исследованиями, подготовкой учебников и учебных пособий Качественная характеристика НПР: -НПР, которые работают на постоянной основе; -совместители;

	-кафедрой руководит: доктор наук, кандидат наук, профессор, доцент; -профессионализм НПР; -дисциплинированность НПР; - поддержка творческой молодежи; -нарушение трудовой дисциплины 3.2 Механизмы определения квалификационных требований к персоналу, его подготовке и повышению квалификации 3.3 Механизмы мотивации, вовлечения и поощрения персонала за деятельность по улучшению качества функционирования вуза 3.4 Обеспечение обратной связи и диалога между персоналом, студентами и руководством вуза 3.5 Повышение качества рабочей среды, обеспечение социальной защиты и повышение благосостояния персонала
4. Ресурсы и партнеры	4.1 Управление финансовыми ресурсами вуза 4.2 Управление материальными ресурсами 4.3 Управление эффективностью технологий обучения и контроля знаний 4.4 Управление информационными ресурсами 4.5 Взаимодействие с внешними партнерами (работодателями, школами и лицеями, средними специальными учебными заведениями, другими вузами)
5. Менеджмент процессов	5.1 Процессы системы менеджмента качества вуза 5.1.1 Внедрение процессного подхода 5.1.2 Управление документацией 5.1.3 Управление записями 5.1.4 Планирование и построение организационной структуры системы менеджмента качества, распределение ответственности и полномочий 5.1.5 Построение, поддержание и развитие системы измерений и мониторинга процессов вуза 5.1.6 Планирование рабочих процессов вуза 5.1.7 Внутренние аудиты (проверки) и самооценка вуза и его структурных подразделений. 5.1.8 Процессы, связанные с постоянным улучшением, корректирующие и предупреждающие действия 5.2. Рабочие процессы вуза 5.2.1 Маркетинговые исследования: - определение видения образования, требований потребителей к квалификационной характеристике, образовательному профилю вуза и учебным планам образовательных программ) 5.2.2 Формирование текущего содержания образовательной деятельности вуза по основным образовательным программам

	5.2.3 Отбор абитуриентов и прием студентов в вуз: - взаимодействие со школами, лицеями и будущими абитуриентами, довузовская подготовка 5.2.4 Процесс обучения 5.2.4.1 Проектирование обучения: - план работы кафедры на учебный год; - проведение заседаний кафедры (протоколы заседаний кафедры, решения совета университета, факультета (копии), отчет о заседаниях кафедры); - учебные планы (графики учебного процесса, выписка из учебных планов, база деканат, индивидуальные учебные планы на каждого магистра заочного отделения); - учебная нагрузка по форме УП-3 (список профессорско-преподавательского состава, отчеты о выполнении учебной нагрузки преподавателями (за осенний и весенний семестры, за год), журнал учета учебной нагрузки); - учебная документация (расписание учебных занятий, составление графика взаимопосещений преподавателей, план проведения открытых лекций, составление графика консультаций преподавателей, журналы учета контрольных работ студентов дневного обучения, журналы учета контрольных работ студентов заочного отделения, информация для студентов–заочников, журнал регистрации входных документов, журнал регистрации выходных документов, заполнение журнала взаимопосещений преподавателей, журнал по инструктажу техники безопасности, планы повышения квалификации преподавателей на календарный год и отчеты преподавателей о проделанной работе, заявление на почасовую оплату, табель выходов и сведения о преподавателях, индивидуальный график работы сотрудников кафедры, участвующих по совместительству в учебном процессе) - рабочие программы и уровень их обновления; - индивидуальные планы преподавателей; - учебно- методическая карта дисциплины (УМКД) 5.2.4.2 Учебно-методическое обеспечение процесса: Учебно-методическое обеспечение специальности: -вариативная часть образовательно-квалификационной характеристики; -вариативная часть образовательно-профессиональной программы; -рабочий учебный план; -рабочие учебные программы по всем дисциплинам учебного плана специальности; -сквозная программа практики;
--	--

	-программа государственного экзамена по специальности; -тематика дипломных работ; -комплект заданий для проведения государственного экзамена; -критерии оценки качества подготовки специалиста образовательно-квалификационного уровня; -методические указания к выполнению дипломных работ специалистов и магистерских работ; -методические указания по вопросам самостоятельной проработки профессиональной литературы. Учебно-методическое обеспечение дисциплин согласно учебному плану: -учебник, учебное пособие, конспект лекций, методические указания дисциплины; -сборник заданий для практических (семинарских) занятий; -методические указания к лабораторным работам; -методические указания к СРС, темы индивидуальных заданий и методические рекомендации относительно их выполнения; -методические указания и тематика курсовых проектов (работ); -комплект экзаменационных билетов; -критерии оценки знаний при проведении экзаменов; -информационные материалы по дисциплинам, доступные для использования студентами 5.2.4.3 Информационное обеспечение процесса: -процесс обеспечения учебного процесса учебно-методической литературой и библиотечное обслуживание; - количество экземпляров основной литературы согласно с программами дисциплин; - обеспечение студентов учебной литературой; - часть практических и лабораторных занятий, организованных на производстве; - использование на занятиях современных методов в преподавании; - наличие современных учебных материалов (слайды, плакаты, макеты...); - НПП постоянно модернизируют знания соответственно к требованиям рынка труда; - НПП проводят подготовку студентов, склонных к новаторству; - сотрудничество кафедр с предприятиями, организациями для прохождения студентами разных видов практик; - наличие электронных учебников; - наличие профессиональных периодических изданий; - наличие компьютерных программ; - доступ в Интернет как источник информации
--	--

	5.2.4.4 Материально-техническое обеспечение процесса: - учебная площадь, закрепленная за кафедрой; - количество помещений - общее количество мест; - закупки и взаимодействие с поставщиками материальных ресурсов; - количество компьютеров, компьютерного учебного класса, количество часов работы каждого студента на ПК, доступ к компьютерной технике с необходимым программным обеспечением; - среднее количество томов учебной литературы из расчета на одного студента; - наличие кафедральной локальной компьютерной сети и выход в Интернет; - обеспечение лабораторным оборудованием; - возможность использовать материально-технические базы внешних организаций; 5.2.4.5 Научно-исследовательская деятельность процесса (НИР). Научные достижения: - объем финансирования НИР; - объем выполненных НИР; - процент участия НИР в научных работах; - количество исполнителей НИР; - отчет о выполняемых Государственных тем; - отчет о внедренных Гостем (форма); - количество экспонатов на выставках; - работы, выполненные по своей технологии; - количество лицензионных соглашений; - количество полученных государственных премий, патентов, документов на изобретения; - участие НИР в научно-практических и научно-методических конференциях, семинарах; - участие в работе Круга качества; - уровень студенческой научной работы; - студенческие конференции; - олимпиады; - уровень работы с аспирантами и докторантами. Научно-методическая работа: - количество изданных монографий; - количество изданных учебников; - количество изданных учебных пособий; - количество изданных совместно со студентами статей в сборниках и журналах 5.2.4.6 Контроль и оценка качества образовательного процесса. Качество проведения учебных занятий.
--	---

	Организация занятий: -соответствие учебному плану, рабочей учебной программе и календарному плану; -педагогический такт, умение держать себя перед аудиторией; -организация проведения занятий (начало и окончание, порядок в помещении, дисциплина студентов, журналы групп..) - целостность и дидактическое обоснование вводной, основной и заключительной частей лекций-занятий; -соответствие отведенного времени объему изучаемого материала; -контроль подготовленности студентов к занятиям по данной теме для всех видов занятий; - контроль усвоения изученного учебного материала для всех типов занятий (зачеты, экзамены, итоговая аттестация и др.) Методический уровень лекций-занятий: - методическое обеспечение занятий; -качество и полнота раскрытия плана занятий; - связь с другими дисциплинами, использование знаний студентов при изучении нового материала лекций; - темп преподавания учебного материала; -обеспечение инициативы и самостоятельности в ходе занятий, привлечение всех студентов к процессу обучения; -обеспечение условий для индивидуальной работы студентов на рабочих местах (учебник, методики, лабораторное оборудование..); - связь с аудиторией, контроль за прослушанным студентами материалом занятий и ведения ими конспектов; - ясность и простота изложения учебного материала, доступность его понимания, четкость и грамотность речи; - наличие, качество и грамотно использовать учебное оборудование; -использование новых форм и методов обучения; -использование электронного экрана, классной доски для записей формул, рисунков...; -связь теории с практическими работами. Научный уровень занятий: - свободное владение учебным материалом; -связь с достижениями науки и техники, информационные технологии; -обучение студентов анализировать и обобщать полученные результаты. Контроль учебного процесса: - система организации и контроля самостоятельной работы студента - результаты выполнения комплексных контрольных работ;
--	--

	-результаты модульного контроля; -результаты курсовых работ; -результаты зачетов; -результаты экзаменационных сессий; -результаты защиты практик; -результаты государственного экзамена; -результаты защит дипломных проектов; -количество человек, которые получили диплом с отличием; -количество выделенных работ Государственной экзаменационной комиссией (ГЭК), имеющих научную или практическую ценность; -работы, выполненные по заказу предприятий; - выпускники, рекомендованные в аспирантуру; - сведения об издании учебно-методической литературы; -контроль за качеством работы преподавателей и кафедр, рейтинг преподавателей 5.2.4.7 Процесс проведения преддипломной практики (ПП): -оформление договоров с предприятиями о проведении ПП; -приказ о преддипломной практике студентов; - письма на предприятия для прохождения ПП, дневник, направление; - письма с предприятий о прохождении ПП; - отчет кафедры о прохождении ПП; - итоги работы филиалов кафедры 5.2.4.7 Процесс проведения Госэкзамена: - приказ о составе ГЭК; - проведение консультации по госэкзамену; - проведение госэкзамена; -проверка и заполнение ведомости по госэкзамену (в течении недели в деканат); 5.2.4.8Процесс проведения дипломирования: - приказ о закреплении тем дипломных работ; -руководящее консультирование по дипломированию; -проведение нормоконтроля дипломов; -консультирование по экономической части дипломных работ; -консультирование по части охраны труда дипломных работ; -проведение дипломирования; -отчет о работе ГЭК; -вручение дипломов 5.2.4.9 Процесс архивирования дел: -курсовые работы студентов, списки курсовых работ и акты на списание; -отчеты студентов о прохождении практик, списки отчетов и
--	--

	акты списания; -лабораторные и контрольные работы; -журналы регистрации курсовых, контрольных работ студентов; -журнал инструктажа по технике безопасности; -журнал регистрации входных документов; -журнал регистрации выходных документов; -акты об уничтожении; -передача дел для хранения в архив ДонНТУ 5.2.4.10 Трудоустройство выпускников университета 5.2.4.11 Воспитательная и внеучебная работа со студентами -воспитание чувства корпоративной гордости – уважение к статусу «студент»; -организация и проведение традиционных праздников «День открытых дверей» университета, «Посвящение в студенты», день студента, торжественный акт вручения дипломов и т.д.; -организация и проведение вечеров-встреч студентов с ветеранами университета, выпускниками прошлых лет и т.д. -организация ежегодного медицинского обследования студентов - кураторство группы; -условия для развития и учебы; -условия общежития; -социальная поддержка студентов 5.2.5 Имидж университета и развитие традиций: - периодическое обновление сайта университета; -выпуск и распространение информационных и рекламных материалов об университете (проспекты, буклеты, значки, ..) 5.2.5 Расширение сферы международной деятельности университета по экспорту и импорту образовательный услуг. Международное сотрудничество 5.2.6 Послевузовское образование, повышение квалификации и переподготовка кадров, аспирантура, докторантура
6.Удовлетворенность потребителей	6.1 Удовлетворенность студентов и выпускников 6.1.1 Механизмы сбора и анализа информации об удовлетворенности студентов и выпускников 6.1.2 Уровень удовлетворенности студентов и выпускников 6.2. Удовлетворенность работодателей 6.2.1 Механизмы сбора и анализа информации об удовлетворенности работодателей 6.2.2 Уровень удовлетворенности работодателей
7. Удовлетворенность персонала	7.1. Механизмы сбора и анализа информации об удовлетворенности персонала 7.2. Уровень удовлетворенности персонала

8. Влияние вуза на общество	8.1. Механизмы сбора информации о влиянии вуза на общество 8.2. Уровень восприятия вуза обществом
9. Результаты деятельности вуза	9.1. Механизмы сбора и анализа информации о результатах деятельности вуза 9.2. Финансовые результаты деятельности вуза 9.3. Другие нефинансовые результаты деятельности вуза

Выводы по результатам исследования. Рассмотренная системная модель позволит повысить эффективность работы высшего учебного заведения с помощью усовершенствования организационной структуры, четкой регламентации деятельности факультетов, кафедр, отделов и служб, улучшения их взаимодействия, повышения степени управления и качества труда административного, профессорско-преподавательского и вспомогательного состава работников, а также для повышения конкурентоспособности и сохранения устойчивого положения ведущих вузов страны в условиях нестабильности внешней среды.

Список литературы: 1. ISO 9001:2008. Системы менеджмента качества. Требования. 2. IWA 2:2007 «Системы управления качеством. Руководство по внедрению стандарта ISO 9001:2000 в сфере образования». 3. Колесников А.А., Козин И.Ф., Кожевников С.А. и др. Всеобщий менеджмент качества: Учеб. пособие / Под общей ред. С.А. Степанова. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2001. 200с. 4. Руководство для участников конкурса 2003 года «Внутривузовские системы обеспечения качества подготовки специалистов», М.: Министерство образования РФ, 2003. 27с. 5. Верклей А., Вестерхейден Д., Железнякова М., Мотова Г. Принципы проведения самообследования. Пилотная версия. Центр исследований политики в области высшего образования (CHEPS) Университета Твенте (Нидерланды). 6. Method for Improving the Quality of Higher Education based on the EFQM Model, the HBO Expert Group, Second English version, October 1999. 88p. 7. 2000 Education Criteria for Performance Excellence Baldrige National Quality Program. National Institute of Standards and Technology, 2000. 80p. 8. McKinnon K.R., Walker S.H., Davis D. Эталонное тестирование: Руководство для Австралийских университетов. Департамент образования, обучения и дел молодежи, Австралийский союз, Февраль 2000. 141 с. 9. В.С. Соболев, С.А. Степанов, А.Ю. Щербаков, В.В. Азарьева // Результаты пилотной апробации методики самооценки вуза на базе новой модели СМК. Университетское управление. 2004. №2. с.102-110.

Є. О. ЯКОВЕНКО, Херсон, Україна

В. Д. ГОГУНСЬКИЙ, д-р техн. наук, Одеса, Україна

П. С. НОСОВ, канд. техн. наук, Херсон, Україна

ОЦІНЮВАННЯ РІВНЯ ОРГАНІЗАЦІЙНИХ ЗНАНЬ

Розроблено модель оцінювання рівня освоєння знань (модель РОЗ) навчального закладу (НЗ), під якою розуміється певна сукупність показників і складових, що характеризують основні компоненти організаційних знань (ОЗ) з позицій менеджменту якості, а також опис рівнів освоєння знань всіх складових, які у сукупності визначають організаційні знання НЗ, направлені на досягнення необхідних результатів якості діяльності НЗ.

Разработана модель оценивания уровня освоения знаний (модель УОЗ) учебного заведения (УЗ), под которой понимается определенная совокупность показателей и составляющих, которые характеризуют основные компоненты организационных знаний (ОЗ) из позиций менеджмента качества, а также описание уровней освоения знаний всех составляющих, которые в совокупности определяют организационные знания УЗ, направленные на достижение необходимых результатов качества деятельности УЗ.

The evaluation model of knowledge mastering level (model of KML) of educational establishment (EE) is developed, which means the certain aggregate of indexes and constituents, which characterize the basic components of organizational knowledge (OK) from positions of quality management, and also description of knowledge mastering levels of all constituents, which in an aggregate determine organizational knowledge of EE, directed on achieving the necessary results of EE quality activity.

Аналіз функцій управління навчального закладу (НЗ) дозволяє виділити наступні головні функції в контексті системних модулів: контур адміністративного управління; контур управління ресурсами; контур вимірювання, аналізу і поліпшення освітніх послуг; контур допоміжних процесів життєвого циклу.

Модульний принцип побудови системи допускає як ізольоване використання окремих програмних модулів, так і їх довільні комбінації, залежно від виробничо-економічної необхідності.

Традиційна технологія процесу організації пошуку інформації в базах даних мультіагентної системи управління знаннями (МАС УЗ) припускає персональне звернення користувача через мережу Інтернет та Інтранет до кожного сервера із запитом, формування за отриманими відповідями

зведеного результату і його подальша обробка. Рутинні операції віднімають у фахівців багато часу, тому розроблено МАС УЗ для автоматизації процесів виконання запитів в розподіленій інформаційній системі, яка бере на себе велику частину рутинних операцій по організації пошуку інформації в базах даних системи серверів. Пошук інформації в базах даних розподіленого середовища МАС має архітектуру, яка представлена на рис. 1.

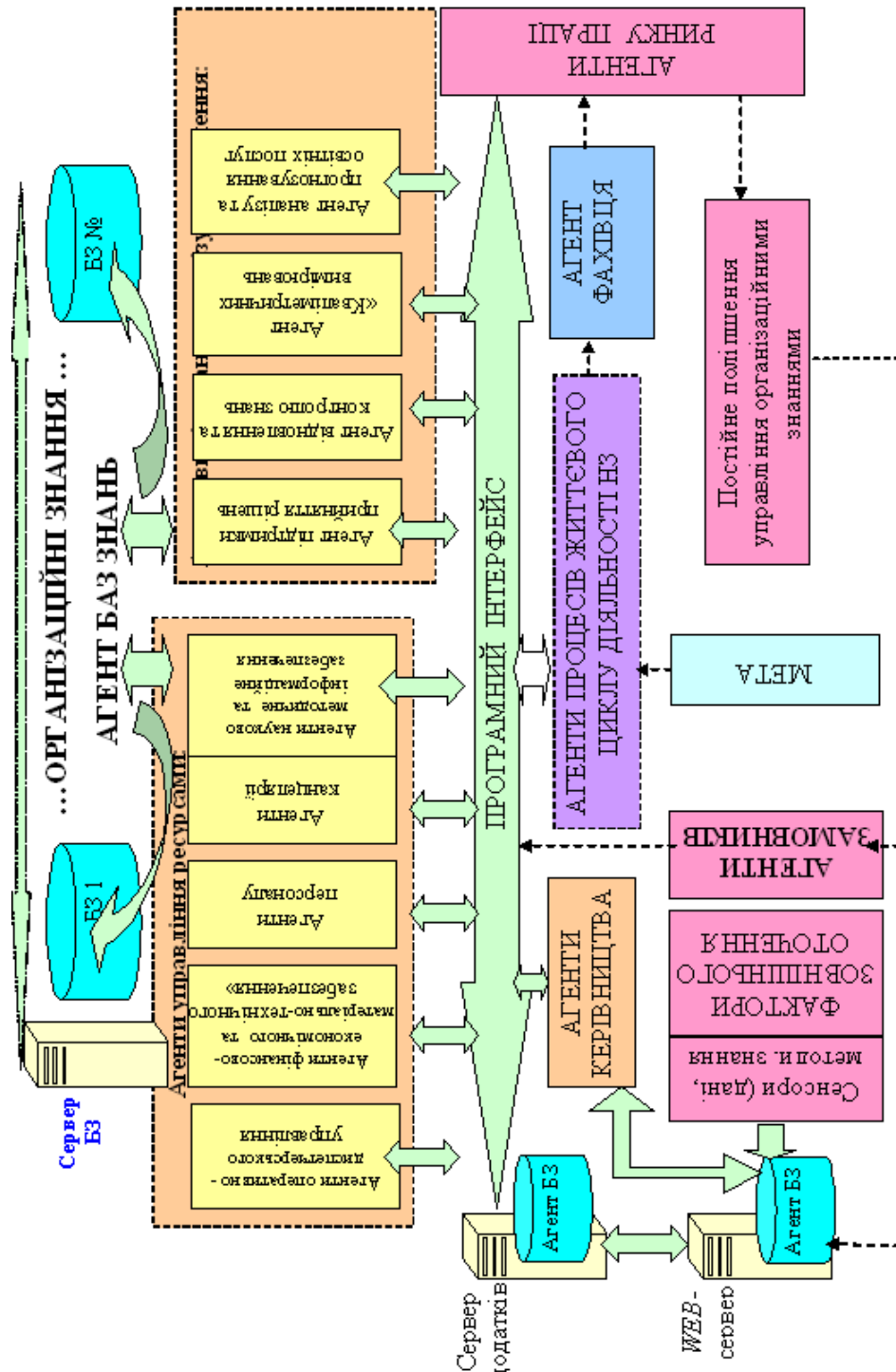


Рисунок 1 – Структура комплексної МАС управління організаційними знаннями

Для проведення моделювання процесу автоматизованого комплексного оцінювання знань розроблено модель оцінювання рівня освоєння знань (модель РОЗ), під якою розуміється певна сукупність показників і складових, що характеризують основні компоненти організаційних знань з позицій менеджменту якості, а також опис рівнів освоєння знань всіх складових, які у сукупності визначають організаційні знання НЗ, направлені на досягнення необхідних результатів якості діяльності НЗ.

Для визначення рівня освоєння знань НЗ розроблено метод, який враховує такі фактори: еталони, стандарти рівня освоєння знань кожної категорії працівників НЗ, де закладаються вимоги суспільства, держави до їх діяльності; апарат оцінювання, який включає задані параметри розвитку керованого об'єкту, показники та критерії оцінки цих параметрів та способи оцінювання; технологію контролю, яка поєднує процеси зовнішньої оцінки та самооцінки з поточним корегуванням.

Метод представляє собою логічний та математичний опис компонентів і функцій, які відображають суттєві властивості модельованого процесу оцінювання рівня освоєння знань НЗ. Метод включає (рис. 2):

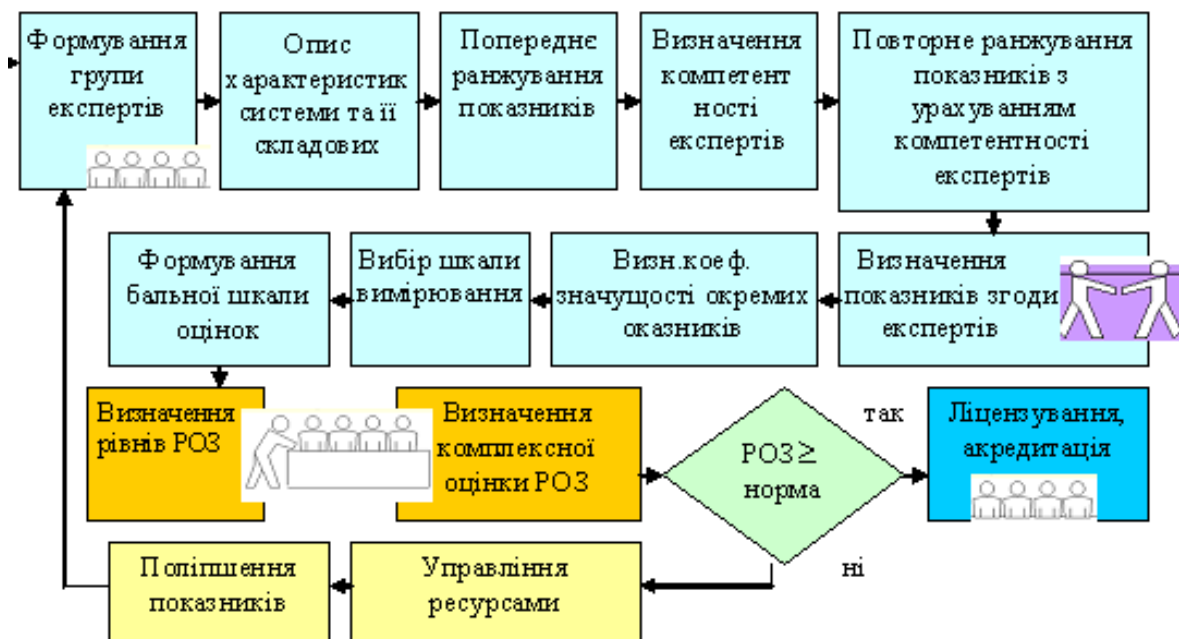


Рисунок 2 – Метод визначення рівня РОЗ

- вибір і представлення загальної схеми системи оцінювання;
- визначення збалансованої системи показників;
- формування групи експертів;

- опис характеристик системи оцінювання та 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 рівня освоєння знань.
- визначення індивідуальних і групових внесків приватних показників.

Визначення комплексної оцінки РОЗ НЗ реалізується через факторно-критеріальне моделювання: створена відповідна модель бажаного стану рівня освоєння знань через виділення параметрів (напрямів освоєння знань), показників (складних властивостей) та критеріїв прояву факторів (простих властивостей). Таким чином, відбувається створення нормативної моделі (еталону), за допомогою якої відстежується стан розвитку об'єкта та відбувається його спрямування на бажаний результат.

Запропонована модель комплексної оцінки РОЗ НЗ дозволяє, здійснити кількісно-якісне оцінювання рівня освоєння знань НЗ, що сприяє активізації його самовдосконалення та саморозвитку.

Модель включає дві групи (перші два модулі моделі), 10 показників верхньої ієрархії (вузлові питання перевірки) та 37 показників нижньої ієрархії, які в свою чергу поділяються на 27 показників нижньої ієрархії, які розкривають зміст кожної групи. Вагомість кожної складової визначена методом експертної оцінки. Модель дає загальну картину комплексної оцінки інтелектуального капіталу НЗ.

Для оцінки рівнів РОЗ всіх показників і їх складових з урахуванням перерахованих вище вимірювань розроблено спеціальну шкалу. Шкала вербально описує п'ять впорядкованих рівнів РОЗ як стадії розвитку показників і їх складових. Це дозволяє перейти від якісної оцінки відповідних показників до їх кількісної оцінки. Для цього вибираємо шкалу оцінювання вибраного рівня РОЗ: I рівень – початковий; II – середній; III – достатній; IV – високий; V – творчий.

П'ять рівнів відповідають визначеним п'ятьом стадіям розвитку показників і їх складових та дають практичні зручності і сумісність із зовнішніми системами оцінювання (рис. 3).

Для комплексної оцінки РОЗ НЗ за всіма показниками і складових моделі з урахуванням вимірювань, перерахованих вище розроблені спеціальні шкали, які вербально описують п'ять упорядкованих рівнів РОЗ або стадії розвитку (критерії) показників і їх складових. Цим п'ятьом рівням РОЗ поставлена у відповідність шкала оцінювання вибраного рівня РОЗ (від 1 до 5 балів).

При цьому залежно від повноти виконання вимог відповідного рівня РОЗ з конкретного показника виставляється оцінка, яка відповідає рівню РОЗ: для 1-го рівня – 1 бал; для 2-го – 2 бали; для 3-го – 3 бали; для 4-го – 4 бали; для 5-го – 5 балів (еталон).

Перевагою запропонованого методу є те, що він забезпечує реальну можливість привести різні властивості варіантів, які змінюються, до спільного знаменника і виконати їхню комплексну оцінку.

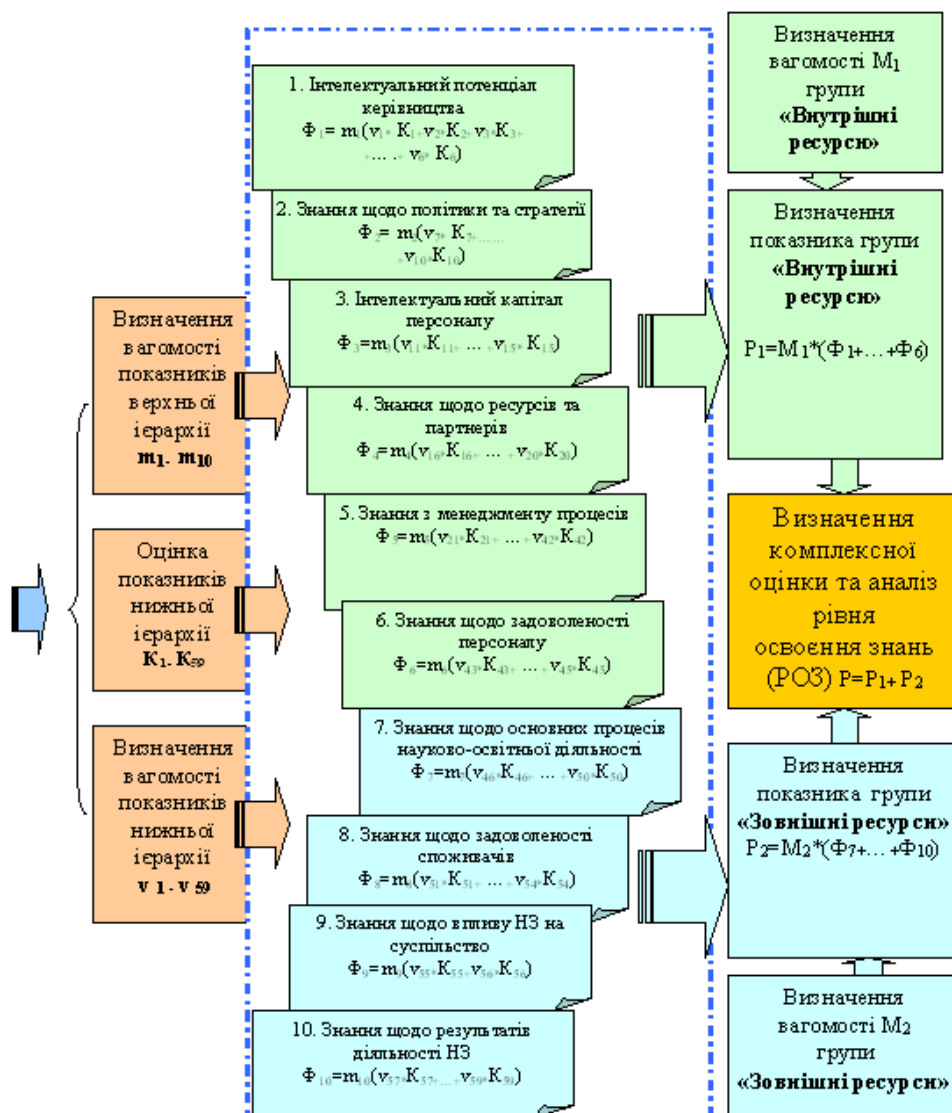


Рисунок 3 – Модель комплексної оцінки РОЗ НЗ

Це дозволяє перейти від якісної оцінки відповідних показників до їх кількісної оцінки за запропонованою шкалою. При цьому алгоритм визначення оціночного числа балів виглядає таким чином:

1. Для кожного показника Моделі послідовно знизу вверх розглядається опис кожного рівня РОЗ (критерії) і визначається найвищий рівень (критерій), вимоги якого частково або повністю виконані.

2. Якщо за конкретним показником, або його складовою, рівень знань НЗ задовольняє всім вимогам даного рівня РОЗ (критерію), то даному показнику привласнюється найвища оцінка для даного рівня – 5.

3. Якщо за конкретним показником, або його складовою, рівень знань НЗ задовольняє тільки декільком вимогам (менше половини) даного рівня РОЗ (критерію), то даному показнику привласнюється нижча оцінка для даного рівня – 2.

4. Якщо за конкретним показником, або його складовою, рівень знань НЗ не задовольняє вимогам даного рівня РОЗ (критерію), то даному показнику привласнюється оцінка для даного рівня – 1.

На основі індивідуальних початкових опитувальних форм (опитувальних протоколів) для кожного показника і його складових заповнюються підсумкові форми, які містять відповідні рівні РОЗ (критерії). Експерт у відповідній графі рівня РОЗ проставляє спеціальну мітку (наприклад, знак “+”), при цьому експерт не знає, яким балом буде оцінений вибраний ним рівень. Це виключає ймовірність дії на експерта із зовні і дає можливість аргументувати свій вибір. При автоматизованому розрахунку комплексної оцінки РОЗ НЗ, при обробці опитувальних протоколів, відмітка у графі рівень досконалості автоматично буде замінена на відповідний бал.

Основною перевагою такого підходу при заповненні опитувальних протоколів є можливість максимального використання індивідуальних здібностей експерта, аргументованість вибору рівня РОЗ, прояв уміння з достатнім ступенем ймовірності оцінити важливість і значення досліджуваного показника і обмеженість психологічного тиску на експерта.

Після формування підсумкових форм результатів визначення рівнів РОЗ (критеріїв) Моделі розраховуються комплексна оцінка РОЗ з урахуванням вагових коефіцієнтів показників і складових.

Список літератури: 1. Визначення узагальненого показника ефективності при моделюванні процесу управління якістю навчального закладу [Текст]: Матер.ІІІ МНТК «Інформаційні технології в наукових дослідженнях і НП»:тези доповідей / [В.Д. Яковенко, А.Ф. Ускач; редкол.: О.С. Меньяйленко (відпов. ред.) та ін.]– Луганськ : ЛНПУ, 2007. – С. 218 – 223. 2. Алгоритм визначення узагальненого показника ефективності якості навчання [Текст]: МНПК «Наука в інформац. просторі» Зб. наук. пр. :тези доповідей / [Яковенко В.Д., Ускач А.Ф., Носов П.С.; редкол.: І.Л. Сазонець (відпов. ред.) та ін.]. – Дніпропетровськ: нац.ун-т, 2007. – 85 с. – ПДАБА.

ЗМІСТ

К. А. Зворыкин – основоположник теории резания металлов	3
---	---

ФІЗИКА ТА МЕХАНІКА ПРОЦЕСІВ ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ

<i>Грабченко А.И., Пыжов И.Н., Федорович В.А.</i> К методологии реализации потенциала различных методов формообразования лезвийных инструментов из ПСТМ	16
---	----

<i>Гусев В.В., Калафатова Л.П.</i> Влияние условий механической обработки обтекателей ракет на надежность их эксплуатации.....	40
--	----

<i>Карпушевски Б., Морек Д., Кушнарченко О.</i> Разработка постпроцессора для пяти-осевого шлифования.....	50
--	----

<i>Ковальов В.Д., Васильченко Я.В.</i> Оптимізація режимів механічного оброблення виробів важкого машинобудування з врахуванням фактичного стану процесу в режимі реального часу	67
--	----

<i>Мельничук П.П., Лосєв В.Ю., Кравчук О.М.</i> Спосіб обробки різанням нежорстких деталей	74
--	----

<i>Рубицки М., Кавалец М.</i> Некоторые проблемы микро-фрезерования поверхности закаленной стали.....	86
---	----

ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ МАШИНОБУДУВАННЯ

<i>Быков В.В.</i> Влияние сил трения на эффективность срабатывания адаптивной системы управления.....	92
---	----

<i>Верещака А.С., Верещака А.А.</i> Некоторые методологические принципы создания функциональных покрытий для режущего инструмента	97
---	----

<i>Доброскок В.Л., Чернышов С.И., Гаращенко Я.Н., Сидорчук Д.П.</i> Обратный инжиниринг промышленных изделий с использованием оптико-цифровой установки объемного сканирования Imetric Iscan	123
--	-----

<i>Илиас Н., Андрас И., Андрас А., Динеску С.</i> Оценка надежности горных технологических систем непрерывного действия.....	136
--	-----

Лавриненко С.Н., Кулинич Г.В., Сазонова М.С. Моделирование площади среза режущими кромками лезвийного инструмента в зависимости от величины подачи, глубины резания и геометрии лезвия..... 143

Проволоцкий А.Е., Лапшин П.С. Шаровые полимеры в технологии струйной обработки 149

Розенберг О.А., Студенец С.Ф., Мельниченко В.В. Исследование процесса комбинированного протягивания гильз двигателей внутреннего сгорания из антифрикционных легированных чугунов..... 161

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ОБРОБКИ

Бондарь А.А., Панова Т.Н., Становский А.Л. Метод виртуального объекта при моделировании жизненного цикла динамических систем..... 170

Грабченко А.И., Доброскок В.Л., Гаращенко Я.Н., Шпилька А.Н. Параметрическая вероятностная модель рабочей поверхности абразивных инструментов 177

Залого В.А., Дядюра К.А., Прокопенко А.В. Методология повышения эффективности взаимозависимых процессов проектирования, изготовления и эксплуатации в проектах машиностроения 192

Ковальчук С.С., Мазурець О.В. Застосування системного моделювання як засобу комплексної оптимізації життєвого циклу металоріжучого інструменту 205

Кундрак Я., Забо Г., Варга Д. Моделирование методом конечных элементов среза в токарной обработке 211

Сидорко В.И., Пегловский В.В., Ляхов В.Н., Поталыко Е.М. Особенности алмазного шлифования природного камня на токарных станках..... 217

Тонконогий В.М., Пернери Л.М., Бовнегра Л.В., Голобородько А.М.

Выбор рациональных материалов рабочих элементов абразивно-выглаживающих разверток с учетом условий обработки..... 223

ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ

Арпентьев Б.М., Резниченко Н.К., Шелкунова Н.Л. Определение

рациональной величины сборочного зазора и температуры нагрева в процессе тепловой сборки деталей..... 228

Бородинов В.А., Козакова Н.В., Мовшович А.Я. Технология

механической обработки и метрологическое обеспечение изготовления изделия «Роликовая опора качения» 234

Клименко Г.П., Андронов О.Ю. Підвищення стабільності

обробки деталей збірними різцями важких верстатів з ЧПК 239

Леонов С.Л., Гончаров В.Д. Методологические основы

прогнозирования геометрических параметров качества поверхности детали 247

Созонов Ю.И., Ламнауэр Н.Ю., Черкашина О.С. Временная модель

качества технологической системы 257

Стецько А.Є. Технологічне забезпечення формування якості

поверхонь деталей машин в процесі їх виготовлення та відновлення 264

Триш Г.М., Коробко С.И. Процессный подход в

управлении качеством 273

ЕКОНОМІКА І ОСВІТА

Калафатова Л.П., Поезд С.А. Минимизация себестоимости

шлифования ситаллов 279

Момот А.И., Мирошниченко Е.В., Михацкая А.В. Структура

и критерии модели системы менеджмента качества ВУЗа..... 290

Яковенко Є.О., Гогунський В.Д., Носов П.С. Оцінювання рівня

організаційних знань 303

Науково-виробниче видання

СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ В МАШИНОБУДУВАННІ

Збірник наукових праць
Українською, російською та англійською мовами

Випуск 4

Відповідальний за випуск: проф. *В. О. Федорович*

Матеріали відтворено з авторських оригіналів

Підп. до друку 27.07.2010 р. Формат 70×100 1/16. Папір офісний.
RISO-друк. Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 20,0. Наклад 300 прим.
1-й завод 1-200. Зам. № 495. Ціна договірна.

Видавничий центр НТУ «ХП».
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 116 від 10.07.2000 р.
61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

Віддруковано в друкарні №18 Південної залізниці.
м. Харків, вул. Червоноармійська, 7.