

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 5

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 "ХП",
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. Верезуб, Ю. М. Внуков, А. І. Грабченко,
Б. Карпушевський, Я. Кундрак, П. П. Мельничук,
О. Я. Мовшович, М. В. Новіков, Ю. А. Сізий,
Ю. В. Тимофієв, Р. С. Турманідзе, В. А. Фадєєв,
М. Д. Узунян

Адреса 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. 5. / редкол.: В. О. Федорович (голова) [та ін.]. – Харків :
НТУ «ХП», 2010. – 350 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

Ф. Я. ЯКУБОВ, Герой Украины, д-р техн. наук, проф.,
Симферополь, Украина

К 75-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ ПРОФЕССОРА ГРАБЧЕНКО АНАТОЛИЯ ИВАНОВИЧА

*Философия каждой специальности основана на
связи последней с другими специальностями, в
точках соприкосновения которых ее нужно
искать.*

Бокль Генри Томас

Исполняется 75 лет со дня рождения заслуженного работника высшей школы Украины, заведующего кафедрой “Интегрированные технологии машиностроения” НТУ “Харьковский политехнический институт” доктора технических наук, профессора Грабченко Анатолия Ивановича.

Грабченко Анатолий Иванович родился 1 ноября 1935 года в городе Константиновке Донецкой области, успешно окончил среднюю школу № 27, трудовую деятельность начал в 1952 году учеником слесаря-инструментальщика на заводе металлоизделий.

В 1953 году поступил на машиностроительный факультет Харьковского политехнического института. Системное освоение научных знаний, формирование научного мировоззрения в студенческие годы соединилось с активной общественной работой.

Он избирался секретарем факультетского комсомольского бюро и заместителем секретаря комитета комсомола института, дважды выезжал на уборку целинного урожая, был награжден грамотами Казахской ССР и медалью «За освоение целинных земель», в составе советской делегации участвовал в 6-ом Всемирном фестивале молодежи и студентов в Москве.

После окончания с отличием института в 1958 году по специальности «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты» был принят ассистентом кафедры «Резание материалов и режущие инструменты», которой заведовал М. Ф. Семко.

С 1958 по 1962 год А. И. Грабченко работал освобожденным секретарем комитета комсомола Харьковского политехнического института, избирался членом РК, ГК, и ОК ЛКСМ Украины. В члены КПСС был принят в 1959 году, избирался секретарем партийного бюро факультета, дважды – членом партийного комитета института.

Активно участвовал в формировании дружественных связей с молодежными организациями других стран, выезжая в Тунис (1959 г.), Великобританию (1961 г.) и Болгарию (1962 г.), с 1960 г. по 1962 г. был членом Комитета молодежных организаций СССР, а в 1962 г. в составе советской делегации участвовал в 7-ом конгрессе международного союза студентов. С 1962 г. по 1966 г. А.И. Грабченко являлся членом ЦК ЛКСМ Украины. В это же время участие в научно-исследовательской работе кафедры определило направленность его научных интересов. Для их реализации А. И. Грабченко в 1962 г. поступил в аспирантуру к выдающемуся ученому Михаилу Федоровичу Семко, которую окончил успешной защитой диссертации в 1966 г. Это была одна из первых в СССР диссертаций по алмазному шлифованию труднообрабатываемых материалов. Творческое освоение традиций ХПИ, становление А. И. Грабченко как ученого и гражданина проходило под огромным, благотворным влиянием личности Михаила Федоровича Семко – ректора, ученого, педагога.

Главной чертой А. И. Грабченко в любой работе, в том числе и научной, является умение увидеть ростки новых тенденций, технологий и смелая разработка этих направлений. Естественным результатом такого видения явилась его диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук на тему: «Научные основы алмазного шлифования сверхтвердых поликристаллических материалов», которая была блестяще защищена в 1995 году.

Талант ученого и организатора научной и педагогической работы Анатолия Ивановича еще более ярко проявился, когда он стал заведующим кафедрой «Резание материалов и режущие инструменты» в 1980 году.

А. И. Грабченко выполнил ряд фундаментальных работ в области технологии обработки материалов резанием, разработал цикл исследований по обрабатываемости широкого спектра

труднообрабатываемых материалов, сформулировал научные основы взаимодействия алмазного инструмента и обрабатываемого материала, создал и развил теорию управления процессом шлифования сверхтвердых материалов путем изменения скорости структурно-топографического приспособляемости рабочей поверхности алмазных кругов.

Анатолий Иванович представляет собой ученого, в котором синтезирован талант исследователя и педагога. Он внес значительный вклад в совершенствование подготовки инженеров, предложив концепцию совместной подготовки студентов и аспирантов с университетами Австрии, Венгрии и Германии, ввел принципиально новые курсы по высоким технологиям, рабочим процессам высоких технологий, технологическому маркетингу и менеджменту высоких технологий, основал издание сборников "Высокие технологии в машиностроении", "Современные технологии в машиностроении", возглавил редколлегию сборника "Резание и инструмент в технологических системах".

Кафедра не только не потерялась во время политических потрясений и распада СССР, а, наоборот, благодаря смелости, инициативности и доверительности личных отношений с зарубежными коллегами А. И. Грабченко стала центром притяжения, единения и консолидации научных сил государств как постсоветского пространства, так и дальнего зарубежья.

Чтобы выполнить такую задачу, Анатолий Иванович с 1990 года основал и возглавил постоянно действующий международный программный комитет ежегодного научно-технического семинара «Высокие технологии в машиностроении» – ИНТЕРПАРТНЕР, а также возглавил организационный комитет ежегодной международной конференции «Информационные технологии MicroCAD» и ежегодных Семковских чтений.

Эти семинары и конференции стали местом своеобразной экспертизы достижений различных научных школ в области обработки материалов, создания новых технологий на этой основе, а также кузницей подготовки специалистов новой формации.

А. И. Грабченко своевременно оценил тенденции создания эффективных высоких интегрированных технологий. Им предложена концепция интегрированных генеративных технологий макро-, микро- и наноуровней; развитие научных исследований в данном направлении привело к созданию первого и пока единственного в Украине учебно-научно-производственного центра высоких интегрированных технологий, оснащенного современным оборудованием и программным обеспечением, а возглавляемая им кафедра "Интегрированные технологии машиностроения" им. М. Ф. Семко начала подготовку специалистов в области генеративных технологий для производства.

Результаты научной работы А. И. Грабченко опубликовал в более чем 500 статьях в отечественных и зарубежных изданиях, 15 монографиях (в том числе и с зарубежными соавторами), учебных пособиях, которые содержат результаты научных разработок, докладах на международных и зарубежных конференциях. Оригинальные научные положения защищены авторскими свидетельствами (свыше 80) и патентами (5 украинских и 5 зарубежных). В 2008 г. А. И. Грабченко удостоен звания Лауреата Государственной премии Украины в области науки и техники.

А. И. Грабченко подготовил более 20 кандидатов и 7 докторов технических наук, принимал участие в процессе аттестации научных работников как оппонент, в качестве заместителя председателя экспертного совета Высшей аттестационной комиссии Украины, а с 2004 года являясь председателем Специализированного Совета по защите ученых степеней.

Для периода заведования кафедрой Анатолием Ивановичем Грабченко характерно создание творческой обстановки в организации учебного процесса, развитие научных исследований, установление продолжительных связей с производством, академическими и научными центрами, зарубежными университетами.

В 1984 году в рамках специальности "Технология машиностроения" открывается специализация "Сверхтвердые инструменты и процессы обработки", в 1996 – "Высокие технологии в машиностроении", в 1998 – "Менеджмент и маркетинг высоких технологий", а в 2003 – "Интегрированные генеративные технологии". В 2008 году кафедра

начинает подготовку бакалавров по специальности "Инструментальное производство" и специалистов по специальности "Качество, стандартизация и сертификация".

Сотрудники кафедры принимают активное участие в международных проектах по внедрению кредитно-модульной системы организации учебного процесса в высших учебных заведениях III-IV уровней аккредитации.

Кафедра сотрудничает с Мишкольцким и Будапештским университетами (Венгрия), Магдебургским и Штуттгартским университетами (Германия), Венским и Клагенфуртским университетами (Австрия), Познанской, Краковской и Вроцлавской политехники (Польша), с университетами Румынии, Греции, Вьетнама, Болгарии, Китая, США, Франции. Кафедра принимает активное участие в международных проектах и межгосударственных научных исследованиях (INTAS, INCOCOPERNICUS, TEMPUS и других).

Кафедра "Интегрированные технологии машиностроения" – одна из квалифицированных технологических кафедр Украины и стран СНГ. Основное научное направление – создание высокоэффективных рабочих процессов, отвечающих требованиям высоких технологий. На кафедре развивается основанная М. Ф. Семко научная школа физики резания материалов. В ее рамках действуют такие научные направления как: рабочие процессы высоких технологий в машиностроении; научные основы высокоэффективных процессов обработки неметаллических и оптических материалов; научные основы лезвийной обработки инструментами из сверхтвердых материалов; научные основы 3D моделирования и автоматизированного проектирования режущих инструментов и процессов обработки; научные основы комбинированных процессов алмазного шлифования; основы интегрированных генеративных технологий.

За последние годы научными работниками кафедры созданы высокоточные прецизионные процессы обработки ответственных изделий для авиационной промышленности, фармацевтической области, двигателестроения; совместно с НТК "Институт Монокристаллов" разработаны прецизионные процессы обработки широкой гаммы

оптических полимерных изделий, которые используются при строительстве нового поколения ускорителей.

Международные связи кафедры характеризуются, прежде всего, активным участием в подготовке специалистов для зарубежных стран. Ежегодно в Мишкольцком университете (Венгрия) группа студентов проходит технологическую практику. Через эту систему прошло более 700 студентов НТУ "ХПИ" в Магдебургском, Штуттгартском, Клагенфуртском и Мишкольцком университетах проходят стажировку аспиранты. Кафедра имеет 12 общих договоров с иностранными партнерами (Германия, Австрия, Венгрия, Греция, Польша, Румыния, Китай). В рамках двусторонних обменов студентам читают лекции известные иностранные специалисты (проф. Ф. Лиерат, проф. М. Хорват, проф. Д. Шнайдер, проф. Я. Кундрак, проф. Э. Весткемпер, проф. А. Мамалис и др.)

Учебный процесс на кафедре ведут 26 преподавателей: 12 профессоров, докторов наук, 12 доцентов, кандидатов наук, 2 преподавателя без ученой степени.

Сегодня кафедра имеет большой парк металлорежущего оборудования, в том числе станки с ЧПУ и робототехнические комплексы, что позволяет дать студентам наглядное представление о всех основных процессах обработки. Кроме того, кафедра имеет в своем распоряжении оборудование для обработки металлов давлением, электродуговой и контактной сварки, виброабразивной и электрохимической обработки и др.

Для поддержания учебного процесса на кафедре собран большой фонд наглядных пособий, в котором представлены практически все современные конструкции металлорежущих инструментов, универсальные и специальные измерительные инструменты, применяемые в машиностроении.

Кафедра имеет измерительную лабораторию, оснащенную микроскопами, твердомерами, профилометрами-профилографами, длиномерами, динамометрами, устройствами для измерения температуры и другой контрольно-измерительной аппаратурой, также физико-техническую лабораторию, в которой студенты на практике знакомятся с устройством и принципом работы растрового электронного микроскопа,

рентгеновского дифрактометра и другой сложной технической аппаратурой для оценки качества состояния поверхностного слоя.

В Центре верификационного моделирования проводятся лабораторные работы, связанные с технологией быстрого изготовления прототипов изделий (Rapid Prototyping) на новейших установках фирмы 3D-Systems – единственных в Украине.

Кафедра "Интегрированные технологии машиностроения" имеет в своем распоряжении сравнительно большой парк персональных компьютеров (больше 40 единиц), на основе которых организовано 2 компьютерных класса.

Создан центр фирмы DELCAM (Бирмингем, Великобритания), который располагает новейшим лицензионным программным обеспечением, а студенты имеют шанс получить стипендию фирмы для включенного обучения.

Кафедра "Интегрированные технологии машиностроения" является выпускающей и несет полную ответственность за окончательное формирование образовательного уровня молодых специалистов. Поэтому кафедра имеет возможность влиять на содержание фундаментальных, профессионально-ориентированных, специальных, гуманитарных и социально-экономических учебных дисциплин, которые изучаются студентами по специальности. Организация действующих обратных связей между дисциплинами, гармоничная система учебно-методического объединения специальности (УМОС) дает возможность в значительной мере улучшить эффективность учебного процесса и в конечном итоге повысить конкурентоспособность выпускников кафедры на рынке работы.

Как профессионал высокого уровня А. И. Грабченко приглашался для работы в комиссии по машиностроению Комитета по Государственным премиям Украины, в научные Советы НАН Украины по отдельным проблемам. Он входит в состав постоянно действующих программных и организационных комитетов международных научных форумов и редакционных коллегий научных изданий в Венгрии, Польши, Румынии, России, научно-методического совета Министерства образования и науки и Профессионального совета Украины по технической механике.

За высокие достижения в научно-педагогической и научно-организационной работе А. И. Грабченко присвоено почетное звание «Заслуженный работник высшей школы Украинской ССР» (1985 г.); он является Почетным доктором Одесского национального политехнического университета, Донбасской государственной машиностроительной академии, Национального технического университета „Харьковский политехнический институт” (2005 г.), Почетным доктором (Honoris Causa) и Почетным профессором Мишкольцкого университета (Венгрия, 1993 г.), Почетным профессором Петрошанского университета (Румыния, 1995 г.), действительным членом Американской ассоциации инженеров-механиков и технологов SME/AMT (1994 г.), членом Ассоциации технологов-машиностроителей Украины, академиком Академии наук высшей школы (1995 г.), членом Международной ассоциации инструментальщиков. Награжден золотыми, серебряными и бронзовыми медалями ВДНХ СССР, медалью «За освоение целинных земель», «За доблестный труд», Большой золотой медалью Мишкольцкого университета (Венгрия), Почетной медалью Отто фон Герике (Магдебургский университет, Германия), Почетной медалью В. М. Бакуля (Институт сверхтвердых материалов НАН Украины), Почетной медалью Познанської политехники (Польша), Почетными грамотами Харьковской областной администрации и Министерства образования и науки Украины, и др. Дипломант первого областного конкурса „Высшая школа Харьковщины – лучшие имена” (2005 г.). Лауреат Премии АР Крым в номинации „Работы для детей и юношества” (2008 г.).

Среди защитивших под руководством А. И. Грабченко кандидатские и докторские диссертации – д.т.н., проф. Залога В. А. – заведующий кафедрой Сумского университета; д.т.н., проф. Внуков Ю. Н. – проректор по науке Запорожского национального технического университета; д.т.н., проф. Мироненко Е. В. – декан, заведующий кафедрой Донбасской машиностроительной академии; д.т.н., проф. Кальченко В. В. – проректор Черниговского политехнического университета; д.т.н., проф. НТУ "ХПИ" Федорович В. А., Доброскок В. Л., Пыжов И. Н.; д.т.н., проф. Кундрак Я. – заведующий кафедрой Мишкольцкого университета (Венгрия).

Можно с абсолютной уверенностью говорить о наличии выдающейся в Украине и мире научно-педагогической школы, которая корнями уходит в поле деятельности основоположников науки механической технологии Константина Алексеевича Зворыкина и Владимира Сергеевича Кнаббе, продолженная выдающимися деятелями высшей школы Украины д.т.н., проф. Наумом Иосифовичем Резниковым и д.т.н., проф. Михаилом Федоровичем Семко, успешно развивается в новых не простых условиях нашего времени. Дело предшественников – в надежных руках.

В завершение позволю себе отойти от установившихся норм подобных публикаций и обратиться непосредственно к юбиляру. С таким обобщением, под которым, уверен, подпишутся многие и многие друзья, коллеги, соратники и ученики.

Дорогой Анатолий!

75 лет – это много!

Это дороги, по которым ты ходил в поисках Мекки и Ватикана!

Это тропы, по которым люди шли к тебе за эликсиром Добра!

Это много дел, тобою сделанных и еще больше задуманных!

75 лет – это жизнь!

Это разбросанные камни и вечное желание собрать их!

Это ностальгия по друзьям, кто бередил душу и след оставил в ней!

Это ученики, прораставшие от твоего мироздания!

75 лет - это мало!

Это незавершенный опыт, рвущийся к новым идеям!

Это недосказанная мысль, недопитое вино в кругу друзей!

Это недотянутые звуки не допетой твоей песни!

Мягкий, не кричащий твой Зов Добра – вот та непреходящая ценность, ради которой к тебе будут еще долгие годы тянуться людские пути и устремления.

За что же Тебя покритиковать, чтобы дать новый импульс твоим устремлениям? Вот так и получается - не за что! Пусть это будет проблемой твоей (да и нашей) милой Нилы Ивановны!

ОБНИМАЕМ и очень просим БОГА-АЛЛАХА – его покровительства, чтобы мы обняли тебя и в 80, и в 90 и 100 лет!

ФІЗИКА ТА МЕХАНІКА ПРОЦЕСІВ ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ

УДК 621.9

Ю. Н. ВНУКОВ, д-р техн. наук,
А. Г. САРЖИНСКАЯ, Запорож'є, Україна

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА СОСТАВЛЯЮЩИХ СИЛЫ РЕЗАНИЯ ПРИ ТОРЦЕВОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ СФЕРИЧЕСКИМИ ФРЕЗАМИ

У статті викладено особливості розрахунку складників сили різання при торцевому фрезеруванні сферичними фрезами.

В статье изложены особенности расчета составляющих силы резания при торцевом фрезеровании сферическими фрезами.

At the article, the cutting force design procedure for milling by ball end mills with direct and spiral wipers is described.

В настоящее время чрезвычайно актуальной является задача определения технологических составляющих силы резания при различных видах обработки. Особенно это касается торцевого фрезерования фрезами со сферической рабочей частью, поскольку данный инструмент нашел широкое применение при изготовлении сложных поверхностей в условиях, когда применение другого инструмента исключено по причине невозможности обработки (наличие поднутрений, скосов, криволинейных поверхностей различных радиусов и проч.). Знание составляющих силы резания в данном случае необходимо для прогнозирования качества обработанной поверхности (при чистовой обработке), а также для расчетов на прочность самого инструмента (при тяжелых условиях работы, например, на обдирочных операциях).

Анализ публикаций по данной теме [1] показывает, что целостный подход к решению данной задачи отсутствует. Зарубежные исследователи [2] рассчитывают силы путем умножения так называемых коэффициентов силы резания на поправочные коэффициенты, учитывающие особенности рассматриваемого вида обработки. Коэффициенты силы резания определяют из экспериментов по ортогональному резанию. Поправочные коэффициенты также являются эмпирическими данными. Использование такого подхода приводит к значительным погрешностям расчетных величин сил. Поэтому необходимо разработать алгоритм, позволяющий определять силы резания с достаточной точностью независимо от вида обработки.

Сложность определения силы резания при работе сферических фрез обусловлена рядом особенностей конструкции данного инструмента и кинематики процесса резания.

В первую очередь, это переменность сечения среза, как на дуге контакта, так и по длине режущей кромки. То есть, в каждой точке режущей кромки i -го зуба, положение которой характеризуется углом φ_{ij} (а положение самого зуба на дуге контакта определяется углом ψ_i), толщина среза определяется как

$$a_{ij} = S_z \cdot \sin \psi_i \cdot \sin \varphi_{ij} \quad (1)$$

Кроме того, скорость резания в каждой точке режущей кромки также переменна, что связано с изменением диаметра. В частности, на пересечении сферы и оси фрезы имеется точка с нулевой окружной скоростью резания (рис.1).

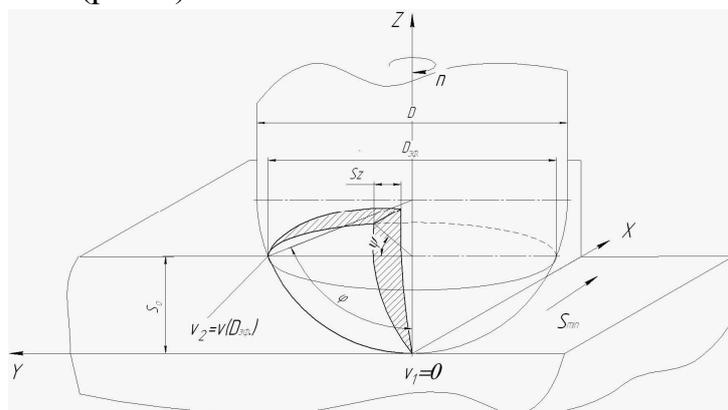


Рисунок 1 – Переменное сечение среза при работе сферической фрезы

Причем при отсутствии стружки деформация обрабатываемого материала не равна нулю. В совокупности с зоной проскальзывания, которая имеет место в силу малых толщин среза (несмотря на то, что скорость в точках режущей кромки, находящихся в зоне проскальзывания, не равна нулю, материал детали не срезается, а подминается под режущую кромку), наличие этой точки приводит к значительному ухудшению качества обработанной поверхности. Поэтому на практике стараются вывести эту точку из зоны резания. Для этого фрезу наклоняют в направлении движения подачи или в направлении, перпендикулярном этому движению. В случае положительного угла наклона точка с нулевой скоростью резания находится за пределами рабочего участка зуба фрезы, а в случае отрицательного угла эта точка попадает в зону обработки, однако она не приходится на нулевую толщину среза, как в случае с нулевым углом наклона (рис.2).

Переменность скорости резания также приводит к тому, что степень деформации ε_{ij} в каждой точке режущей кромки разная, а значит, и удельные силы, возникающие в процессе резания, в каждой точке режущей

кромки тоже разные, они уменьшаются по мере увеличения скорости – от центра к периферии фрезы. Кроме того, с изменением окружной скорости (в данном случае - скорости главного движения) при постоянной скорости вспомогательного движения (движения продольной подачи) изменяется кинематический передний угол γ_k , что также приводит к изменению степени деформации.

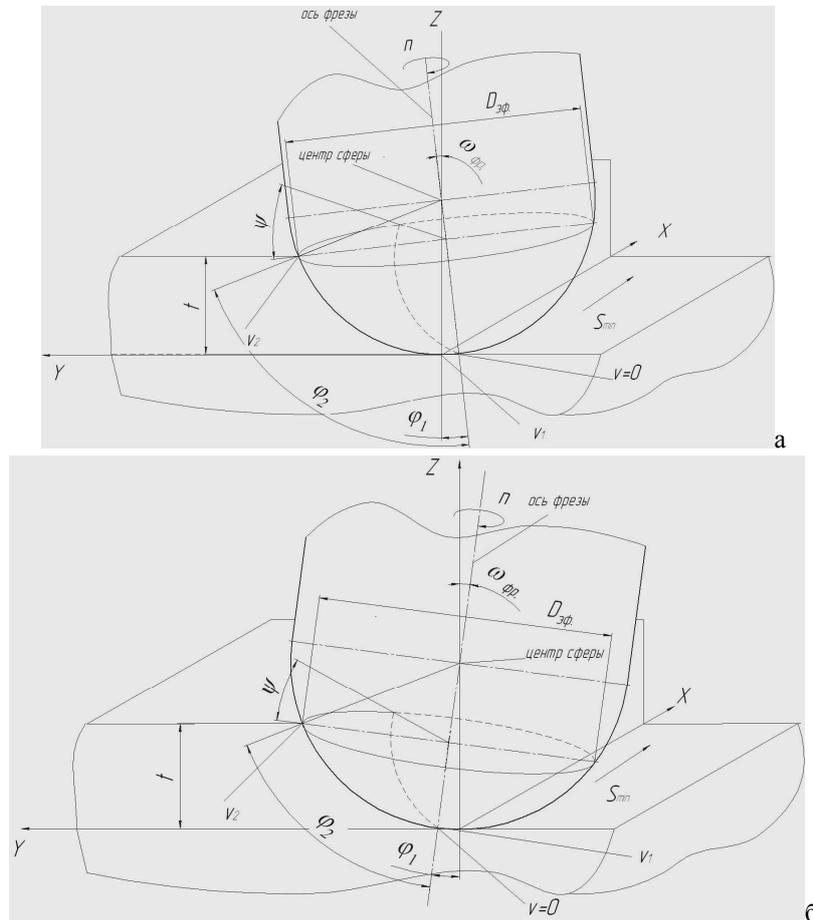


Рисунок 2 – Наклон сферической фрезы в процессе работы (а – к обрабатываемой поверхности; б - от обрабатываемой поверхности)

Все вышеперечисленные особенности должны быть учтены при определении составляющих силы резания. Однако, поскольку количество их велико, целесообразно сначала провести анализ степени их влияния на конечный результат расчета. Так, например соотношение скоростей главного и вспомогательного движений при данном виде обработки таково, что изменением скорости главного движения можно пренебречь, и использовать в расчете величину статического переднего угла, приняв его значение постоянным.

Рассмотрим задачу определения составляющих силы резания на примере наиболее простого варианта обработки – резания сферической фрезой с прямым зубом при угле наклона фрезы, равном 0 ($\omega_{фр.} = 0$) (рис.1). Положение каждого зуба характеризуется углом ψ_i на дуге контакта. Угол контакта определяется аналогично цилиндрическому фрезерованию

$$\theta = \arccos(1 - 2S_r / D_{эф.}), \quad (2)$$

где S_r - радиальная подача, мм; $D_{эф.}$ - эффективный диаметр, мм.

$$D_{эф.} = 2\sqrt{S_o \cdot (D - 2S_o)}, \quad (3)$$

где S_o - осевая подача, мм; D – диаметр фрезы, мм.

Тогда угол, определяющий длину режущей кромки зуба, участвующую в работе, рассчитываем так

$$\varphi = \arccos\left(\frac{D - 2S_o}{D}\right). \quad (4)$$

Среднюю скорость на зубе определяем интегрированием скорости в точке по длине кромки

$$\bar{v}_i = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} v_{\max} \sin \varphi_{ij} d\varphi = v_{\max} (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2), \quad (5)$$

где v_{\max} - скорость в точке, расположенной на диаметре D , м/мин; φ_1, φ_2 - углы, определяющие границы рабочего участка режущей кромки, град;

$$v_{\max} = \frac{\pi D n}{1000},$$

где n - частота вращения фрезы, об/мин

Для случая, когда угол наклона фрезы равен 0: $\varphi_1 = 0$, $\varphi_2 = \varphi$. Тогда средняя скорость на зубе согласно формуле (5) равна

$$\bar{v}_i = \int_0^{\varphi} v_{\max} \sin \varphi_{ij} d\varphi = v_{\max} (1 - \cos \varphi).$$

Поскольку, как упоминалось выше, с изменением скорости степень деформации срезаемого слоя также изменяется, целесообразно в расчетах использовать среднюю степень деформации по длине режущей кромки,

величина которой $\bar{\varepsilon} = \varepsilon(\bar{v})$ определяется по методике, подробно изложенной в работе [3].

В остальном составляющие силы резания при фрезеровании сферическими фрезами определяются аналогично цилиндрическим фрезам. Схема сил, действующих на зуб сферической фрезы, условно показана на рис.3.

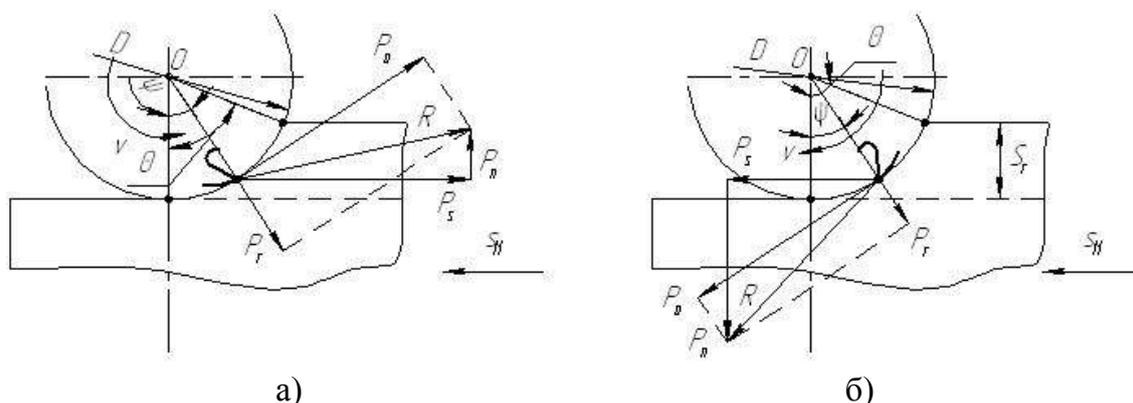


Рисунок 3 – Схема сил, действующих при работе прямого зуба сферической фрезы (а - встречное фрезерование, б – попутное фрезерование) (упрощенно)

Согласно методике [4] запишем выражения для окружной и радиальной составляющих силы на i -ом зубе фрезы, расположенном на угле ψ_i на дуге контакта:

$$P_{oi} = B \left(C_{III} S_z \sin \psi_i \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \sin \varphi d\varphi + C_\rho + C_h \right) = R\varphi \left(C_{III} S_z \sin \psi_i \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \sin \varphi d\varphi + C_\rho + C_h \right) \quad (6)$$

$$P_{ri} = B \left(U_{III} S_z \sin \psi_i \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \sin \varphi d\varphi + U_\rho + U_h \right) = R\varphi \left(U_{III} S_z \sin \psi_i \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \sin \varphi d\varphi + U_\rho + U_h \right) \quad (7)$$

где C_{III}, U_{III} - удельные силы на передней поверхности; C_ρ, U_ρ - удельные силы, действующие на радиус округления режущей кромки со стороны передней поверхности инструмента; C_h, U_h - удельные силы, действующие на площадку износа по задней поверхности; B - длина режущей кромки, мм.

$$B = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} R d\varphi = R \cdot (\varphi_2 - \varphi_1) = R\varphi \quad (8)$$

Методика определения удельных сил, действующих на зуб фрезы, также подробно описана в работе [4].

Как видно из рисунка 3, первая составляющая равнодействующей силы резания (совпадающая с вектором скорости резания) – это окружная сила P_o , а вторая – перпендикулярная ей радиальная сила P_r . Следовательно, разложив векторную сумму этих двух сил на соответствующие направления, получим еще две технологические составляющие силы резания – силу подачи P_s и силу отжима P_n .

Тогда

$$P_{si} = \pm P_{oi} \cos \psi_i + P_{ri} \sin \psi_i \quad (9)$$

$$P_{ni} = \pm P_{oi} \sin \psi_i - P_{ri} \cos \psi_i \quad (10)$$

Верхние знаки в формулах (9) и (10) соответствуют случаю встречного фрезерования, нижние – попутного.

Имея зависимости для определения сил, действующих на один зуб фрезы, можно рассчитать мгновенные значения составляющих силы резания, действующей на фрезу. В общем виде формула имеет вид

$$P_k = \sum_{i=1}^m P_{ki}, \quad (11)$$

где P_k - сила, действующая на фрезу в заданном направлении k , Н; P_{ki} - сила, действующая на i -ый зуб фрезы в заданном направлении k , Н; m – количество одновременно работающих зубьев,

$$m = \frac{\theta}{\beta},$$

где $\beta = \frac{2\pi}{z}$ - угловой шаг зубьев фрезы.

При расчете сил, действующих на сферическую фрезу с винтовым зубом, а также при наклоне сферы в процессе работы, необходимо учитывать величины заданных углов ω и $\omega_{фр.}$ соответственно.

Список литературы: 1. Внуков Ю.Н., Саржинская А.Г. Анализ особенностей различных подходов при аналитическом расчете сил резания // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар.науч.-техн.сб. –Харьков: НТУ «ХПИ», 2008.- Вып.74. - С.31-56. 2. Y. Altintas, E.Shamoto and other. Analytical prediction of stability lobes in ball and mill//Transactions of ASME.-Vol.121, November 1999, pages 586-592. 3. Внуков Ю.Н., Саржинская А.Г. Методика теоретического определения составляющих силы резания при токарной обработке// Вестник национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт». Машиностроение.- К.: НТУУ «КПИ».-2007.-№ 52.-С.377-384. 4. Внуков Ю.Н., Саржинская А.Г. Методика теоретического определения составляющих силы резания при фрезерной обработке// Резание и инструмент в технологических системах. – Харьков: НТУ «ХПИ» - 2009 - №77 –С.31-46.

В. А. ЗАЛОГА, д-р техн. наук,

К. А. ДЯДЮРА, канд. техн. наук, Сумы, Украина

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ПОДХОД К ПРОЕКТИРОВАНИЮ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ИЗДЕЛИЯ

Запропоновано модель формування характеристик машинобудівної продукції виробничо-технічного призначення на етапі проектування й розробки за допомогою функціональної підсистеми, що у рамках постійно вдосконалюваних інтегрованих інформаційних технологій враховує ефективність технічного й програмного забезпечення, а також зміни показників оперативного персоналу при реалізації безлічі функцій виробу.

Предложена модель формирования характеристик машиностроительной продукции производственно-технического назначения на этапе проектирования и разработки с помощью функциональной подсистемы, которая в рамках постоянно совершенствуемых интегрированных информационных технологий учитывает эффективность технического и программного обеспечения, а также изменения показателей оперативного персонала при реализации множества функции изделия.

The offered model of forming of descriptions of machine-building products setting is on the stage of planning and development by a functional subsystem, which within the framework the constantly perfected integrated information technologies takes into account efficiency of the technical and programmatic providing, and also changes of indexes of operative personnel.

Введение. Повышение конкурентоспособности современной машиностроительной продукции во многом зависит от информационного обеспечения процессов конструкторско-технологической подготовки производства [1], которые в общей модели жизненного цикла изделия (ЖЦИ) [2] занимают важное место [3]. Скорость, полнота и качество решения задач на этом этапе влияет на эффективность изготовления и удовлетворение требований заказчиков при эксплуатации изделия. Процессы подготовки производства сопровождаются разработкой больших объемов технической документации.

Прежде, чем создать машиностроительное изделие, оно разрабатывается в знаковом виде [4]. Знаковая информация содержит конкретные значения характеристик, которые определяют объективные состояния изделия на различных этапах его существования. На этапе конструкторской подготовки поступающая от заказчиков информация

сравнивается с характеристиками изделий конкурентов, результатами научно-технического прогресса, а также уже существующими на предприятии шаблонами (прототипами) - базами данных конструкционных материалов, стандартных или покупных изделий, комплектующих и т.п. Конструктор имеет доступ к информации об изделии или изделиях, уже спроектированных в рамках единого информационного пространства и может заимствовать узлы и детали, а также сравнивать варианты и исполнения изделий. Это позволяет повысить унификацию продукции предприятия, уменьшить объем выпускаемой номенклатуры комплектующих деталей и сборочных единиц и, соответственно, уменьшить сроки подготовки производства, снизить себестоимость изделия и повысить его конкурентоспособность.

Критериями выбора вариантов решений, как правило, служат экономические показатели [5, 6] (минимальная стоимость, затраты) или технические характеристики продукции [7, 8]. Параллельно с конструктором над этим же проектом изделия могут работать дизайнеры, экономисты, технологи, специалисты по инженерным расчетам и материально-техническому снабжению и т.д. Это позволяет одновременно провести оптимизацию конструкции по разным показателям, отладить программы обработки на станках с ЧПУ и собрать всю информацию в рамках единого информационного пространства.

На основе информации об изделии (состав, применяемые материалы, стандартные и покупные комплектующие), используемых технологиях и характеристиках производственного оборудования изготавливают машиностроительную продукцию и проводят контроль качества и промышленные испытания. Процессы эксплуатации связаны с реализацией, поддержанием и восстановлением качества изделия.

Таким образом, в настоящее время быстрота и экономичность вывода на рынок новой машиностроительной продукции производственно-технического назначения фактически сводится к освоению и применению наукоемких компьютерных технологий. Однако для этого необходимы соответствующие модели организации процессов проектирования и разработки изделия.

Постановка задачи. В соответствии со стандартом ДСТУ ISO 9000:2007 проектирование и разработка – это совокупность процессов, которые преобразуют требования в установленные характеристики или в технические условия на продукцию, процесс или систему.



Рисунок 1 – Совокупность процессов проектирования и разработки продукции производственно-технического назначения.

В широком смысле под проектированием и разработкой новой или модернизацией изготавливаемой продукции понимается весь комплекс, который включает научно-исследовательские (НИР), опытно-конструкторские (ОКР) и опытно-технологические работы (ОТР), экономические исследования, технологическую подготовку производства и опытное производство, в том числе нормирование, комплектование и материально-техническое снабжение (МТС) (рис. 1.).

Всю совокупность процессов проектирования и разработки изделий можно разделить на две категории [9]:

- процессы управления проектом, включающие описание и организацию деятельности по проекту;
- процессы, ориентированные на изделие, определяющие ЖЦ проекта и касающиеся непосредственно спецификации и производства нового изделия.

В результате задачи процессов проектирования и разработки рассматриваются в двух аспектах:

- выбор перспективных направлений и формирование требуемых параметров изделия;
- выбор оптимального способа развертывания во времени процессов создания перспективных объектов, т.е. управление процессами научных исследований и опытно-конструкторских разработок.

В первом случае необходимо обеспечить высокий уровень функциональных характеристик проектируемого перспективного объекта,

во втором – эффективное использование ресурсов в условиях ограничения их во времени. Только при комплексном решении проблем во времени достигается эффективное управление

В зависимости от функции проектирования управляющее воздействие на процесс выражается в виде планов, технических заданий и т.п.

Система разработки и постановки продукции на производство [10] в общем случае предусматривает проведение следующих работ [11] (рис. 2.):

- разработка технического задания (ТЗ);
- разработка технической документации;
- изготовление и проведение испытания образцов продукции;
- приемка результатов разработки;
- подготовка и освоение производства продукции.

Разработка изделия представляет собой процесс, складывающийся из ряда последовательно выполняемых операций (этапов) в ходе которых создается конечный продукт – научно-техническая документация (НТД):

техническое предложение;

эскизный проект;

технический проект;

рабочая конструкторская документация опытного образца (опытной партии).

Современные процессы проектирования и разработки продукции осуществляются функциональными подсистемами проектирования ($\Phi П С_{пр}$), которые представляют программно-методические комплексы (ПМК) систем автоматизированного проектирования (САПР). Автоматизации также подлежат задачи оперативного планирования и учета материальных ресурсов, таких как: расчет потребности в сырье, материалах, полуфабрикатах, комплектующих изделиях по соответствующим заказам; заключение договоров на поставку необходимой продукции; формирование, контроль и анализ графика снабжения.

Согласно [12] ПМК САПР - взаимосвязанная совокупность компонентов программного, информационного и методического обеспечения системы автоматизированного проектирования (включая, при необходимости, компоненты математического и лингвистического обеспечения), необходимая для получения законченного проектного решения по объекту проектирования или выполнения унифицированной процедуры.

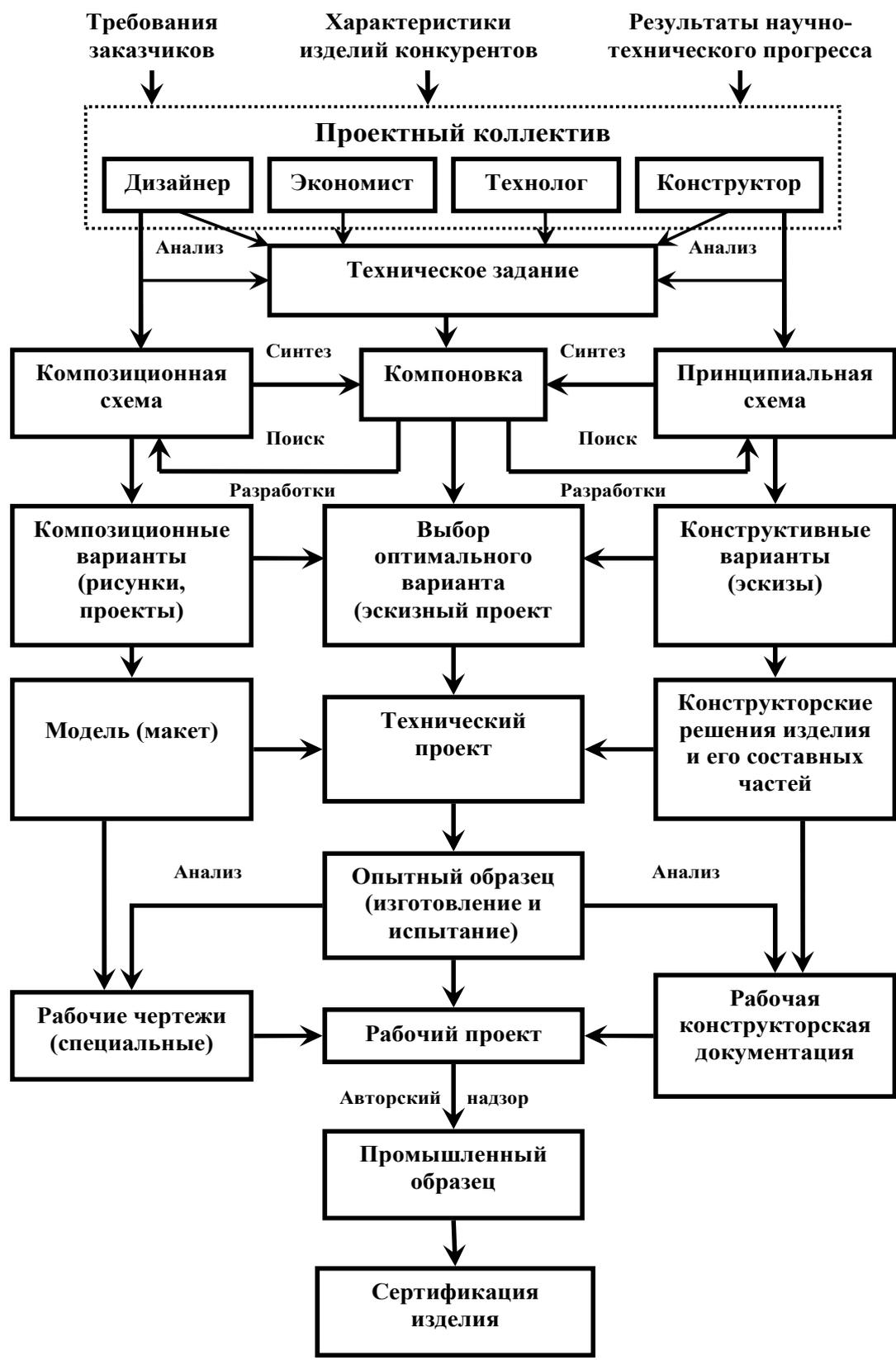


Рисунок 2 – Структурная схема работ при разработке технического проекта

Функциональная подсистема проектирования $\Phi П С_{пр}$ включает в себя следующие элементы:

- CAE – Computer Aided Engineering (автоматизированные расчеты и анализ);
- CAD – Computer Aided Design (автоматизированное проектирование);
- CAM – Computer Aided Manufacturing (автоматизированную технологическую подготовку);
- PDM – Product Data Management (управление проектными данными);
- SCM – Supply Chain Management (управление цепочками поставок);
- CRM – Customer Relationship Management (управление взаимоотношениями с заказчиками).

Приведенные элементы являются интегрированными автоматизированными системами, т.е. функционирование одной из них зависит от результатов функционирования другой (других) так, что эту совокупность можно рассматривать как единую $\Phi ПС_{пр}$.

Эффективность выполнения функции проектирования определяется характеристиками $X_{\Phi ПС_{пр}}$, которые, в свою очередь, во многом зависят от характеристик групп технических, программных средств и оперативного персонала, участвующих в выполнении данной функции (рис. 3.).

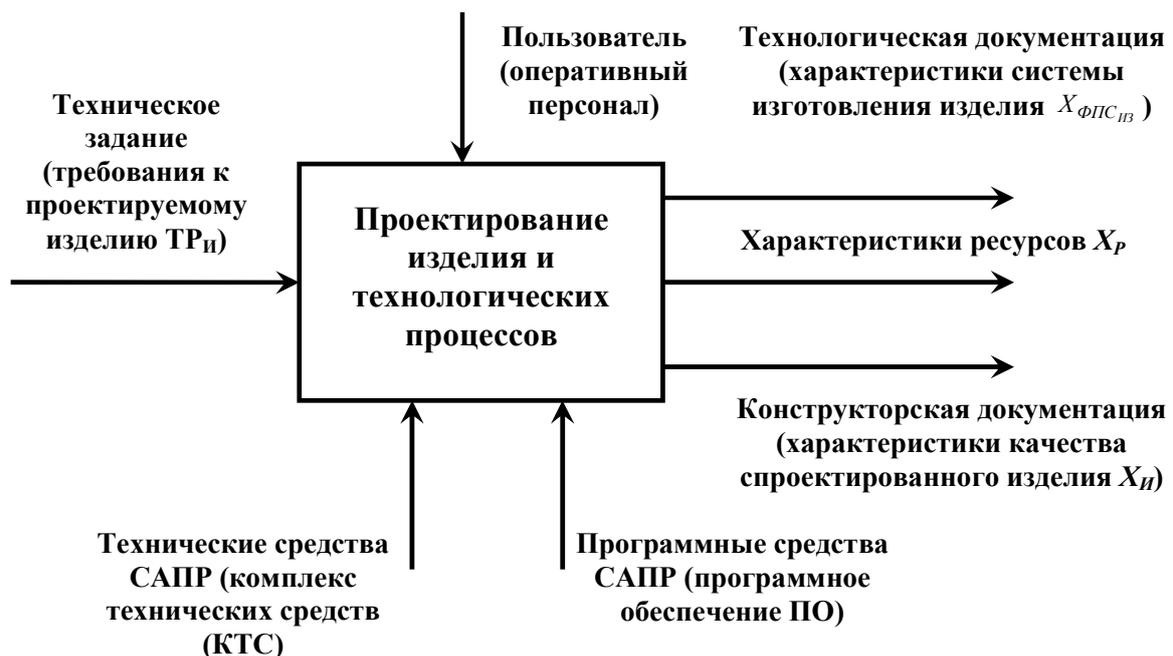


Рисунок 3 – Общая схема процесса проектирования и разработки изделия средствами САПР

Целью данной работы является разработка модели формирования характеристик машиностроительной продукции производственно-технического назначения на этапе проектирования и разработки с помощью функциональной подсистемы, которая в рамках постоянно

совершенствуемых интегрированных информационных технологий учитывает эффективность технического и программного обеспечения, а также изменения показателей оперативного персонала при реализации множества функций изделия.

Результаты исследований. Структурная декомпозиция, синтез и многокритериальный выбор альтернативных вариантов функциональной подсистемы изделия ($\Phi ПС_{И}$) (табл. 1) возможен на основе обобщенной структурной модели, которую можно представить в виде

$$\Phi ПС_{И} = \{H_{И}, \Phi_{И}, Str_{И}, X_{\Phi ПС_{И}}, I_{И}\}, \quad (1)$$

где H_0 – множество структурно-параметрических характеристик взаимодействия $\Phi ПС_{И}$ с внешней для него средой; $\Phi_{И}$ – множество функций $\Phi ПС_{И}$; $Str_{И}$ – структура $\Phi ПС_{И}$; $X_{\Phi ПС_{И}}$ – множество характеристик $\Phi ПС_{И}$; $I_{И}$ – предыстория $\Phi ПС_{И}$.

Исходной информацией для процесса проектирования и разработки изделия является техническое задание (ТЗ) – документ устанавливающий основное назначение, технико-экономические и специальные требования к изделию ($Tr_{И}$), объему и стадиям разработки и составу конструкторской документации [10]. Конкретное содержание ТЗ, порядок его разработки и утверждения определяет исполнитель с обязательным согласованием с заказчиком. Формирования требований в ТЗ осуществляют на основе результатов выполнения предыдущих исследований, в т.ч. маркетинговых, и экспериментальных работ, анализа патентной, научно-технической документации, информационных материалов о новейших достижениях отечественной и зарубежной науки и техники, научного прогнозирования и перспектив дальнейшего развития рынка, а также опыта предыдущей разработки и эксплуатации аналогичной продукции.

Конструкторская подготовка производства может включать проектирование как новой продукции, так и модернизацию ранее производившейся. Целью данного этапа является разработка модели проектируемого изделия. В процессе проектирования определяется состав $\Phi ПС_{И}$, ее конструкция, технико-экономические и другие характеристики $X_{\Phi ПС_{И}}$. Важным этапом в обеспечении качества спроектированного машиностроительного изделия является технологическая подготовка производства, которая представляет собой совокупность взаимосвязанных процессов, обеспечивающих технологическую готовность предприятия к выпуску изделий заданного уровня качества при установленных сроках, объеме выпуска и затратах. Технологическая подготовка производства

является продолжением работ по проектированию $\Phi ПС_{И}$. На этой стадии устанавливается, при помощи каких функциональных подсистем изготовления ($\Phi ПС_{ИЗ}$) должны быть обеспечены характеристики качества данного изделия $X_{\Phi ПС_{И}}$.

Таблица 1 – Формирование характеристик $\Phi ПС_{И}$

№ п/п	Этапы формирования характеристик
1	Определение характеристик изделия, обуславливающих удовлетворение определенных потребностей рынка в соответствии с ее назначением. (формирование целевых функций изделия, описание структуры характеристик, систематизация, оценка и отбор решений на основе экспертизы)
2	Определение важности и ценности каждой единичной характеристики. (идентификация цели формирования $\Phi ПС_{И}$, формирование класса задач, в пределах которых будут синтезированы варианты $\Phi ПС_{И}$)
3	Сравнение показателей характеристик продукции, выпускаемой предприятием, конкурентами и востребованных потребностями рынка.
4	Определение перспективного уровня характеристик изделия. (формирование вариантов $\Phi ПС_{И}$)
5	Установление условий, факторов и причин, влияющих на соответствующие характеристики и определяющие их уровень. (оценка, и отбор и оптимизация решений на основе лабораторных и эксплуатационных испытаний)
6	Разработка стратегического плана предприятия для достижения перспективного уровня характеристик качества изделия. (разработка технологии изготовления и контроля)
7	Обеспечение перспективного уровня характеристик качества изделия с минимальными затратами. (согласование вариантов $\Phi ПС_{И}$ по критериям проектных задач и выбор наиболее рационального)

В общем случае структурная модель технологического процесса может быть записана в виде

$$X_{ТП} = F(Str_{ТП}^{\Phi П}), \quad (2)$$

где $X_{ТП}$ - множество выходных характеристик технологического процесса;
 $Str_{ТП}$ - структура технологического процесса.

Множество $X_{ТП}$ определяется, как

$$X_{ТП} = \{X_{Т.И.}, X_{Пр}, X_{Нд}, X_{М}, X_{ЭН}, X_{С}\}, \quad (3)$$

где $X_{Т.И.}$ – трудоемкость изготовления; $X_{ПР}$ – производительность технологического процесса; $X_{НД}$ – надежность; X_M – расход материальных ресурсов; $X_{ЭН}$ – расход энергетических ресурсов; X_C – себестоимость изготовления.

Структура технологического процесса представляет собой

$$Str_{ТП}^{\Phi\Pi} = \langle \Phi\Pi, \varepsilon^{\Phi\Pi}, X_{\Phi\Pi C_{ИЗ}} \rangle, \quad (4)$$

где $\Phi\Pi = \{\Phi\Pi^0, \Phi\Pi^1, \dots, \Phi\Pi^{\mu-1}\}$ – множество элементов $\Phi\Pi C_{ИЗ}$, участвующих в технологическом процессе; $\varepsilon^{\Phi\Pi} = \{\varepsilon_1^{\Phi\Pi}, \varepsilon_2^{\Phi\Pi}, \dots, \varepsilon_j^{\Phi\Pi}, \dots, \varepsilon_\mu^{\Phi\Pi}\}$ – множество связей между элементами $\Phi\Pi$; $X_{\Phi\Pi C_{ИЗ}} = \{X_{\Phi\Pi C_{ИЗ_1}}, X_{\Phi\Pi C_{ИЗ_2}}, \dots, X_{\Phi\Pi C_{ИЗ_M}}\}$ – множество характеристик элементов $\Phi\Pi C_{ИЗ}$.

Множество выходных характеристик технологического процесса можно обозначить, соответственно, через $X_{\Phi\Pi C_{ИЗ}}$, как

$$\begin{aligned} X_{Т.И.} &= \sum_{j=1}^N X_{\Phi\Pi C_{ИЗ_j(Т.И.)}}, \quad X_{ПР} = \sum_{j=1}^N X_{\Phi\Pi C_{ИЗ_j(ПР)}}, \quad X_{НД} = \sum_{j=1}^N X_{\Phi\Pi C_{ИЗ_j(НД)}}, \\ X_M &= \sum_{j=1}^N X_{\Phi\Pi C_{ИЗ_j(M)}}, \quad X_{ЭН} = \sum_{j=1}^N X_{\Phi\Pi C_{ИЗ_j(ЭН)}}, \quad X_C = \sum_{j=1}^N X_{\Phi\Pi C_{ИЗ_j(C)}}. \end{aligned} \quad (5)$$

Таким образом, на этапе технологической подготовки возникает проблема выбора оптимальных характеристик функциональной подсистемы изготовления изделия $X_{\Phi\Pi C_{ИЗ}}$.

Как правило, в технологии машиностроения при составлении технологического процесса принято каждое изделие разбивать на исполнительные поверхности. Технологический процесс проектируют, основываясь на определенной последовательности $\Phi\Pi C_{ИЗ}$, которые обеспечивают свойства этих поверхностей. Для изготовления одного и того же изделия с одинаковыми свойствами исходного и конечного состояния могут использоваться различные $\Phi\Pi C_{ИЗ}$. В связи с этим, проектируемые технологические процессы, как правило, варианты, соответствующие каждой из рассматриваемых $\Phi\Pi C_{ИЗ}$.

На этапе МТС устанавливается при помощи каких материальных (сырье, материалы, покупные полуфабрикатах и комплектующие изделий) и энергетических (электро-, тепло-, водо– обеспечение и др.) ресурсов будут реализованы требуемые значения $X_{\Phi\Pi C_{ИЗ}}$, при соответствующих характеристиках $X_{\Phi\Pi C_{ИЗ}}$. Основной целью функциональной подсистемы

$\Phi ПС_j$, которая реализует управление МТС, является оперативное обеспечение потребностей производства в материальных ресурсах при минимальных затратах на их приобретение, транспортировку и хранение.

Сотрудничество с поставщиками и партнерами на этом этапе обеспечивает разнообразные возможности: оптимизацию их количества, мониторинг, привлечение к проектированию и разработке общей стратегии изделия и т.д.

Схематично взаимодействие процессов проектирования и разработки продукции производственно-технического назначения представлено на рис. 4. Проектирование сложной технической системы представляет собой итеративный процесс принятия решений по определению совокупности функциональных подсистем $\Phi ПС_j$, способных выполнить все требуемые функции с последующим определением совокупности средств ($\Phi П_{КТС_j}$, $\Phi П_{ПО_j}$, $\Phi П_{ОП_j}$), из которых состоят указанные подсистемы.

Функцию преобразования можно математически представить следующими тремя выражениями

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{НИОКР} : Tr_{И} &\rightarrow R_{НИОКР} \\ \varphi_{КПП} : R_{НИОКР} &\rightarrow X_{И}; \\ \varphi_{ТПП} : X_{И} &\rightarrow X_{\Phi ПС_{ИЗ}}; \\ \varphi_{МТС} : X_{\Phi ПС_{ИЗ}} &\rightarrow X_{Р} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где $\varphi_{НИОКР}$ – отображение (преобразование) требований к изделию $Tr_{И}$ в результаты НИР и/или ОКР и ОТР $R_{НИРОКР}$; $\varphi_{КПП}$ – отображение (преобразование) на этапе КПП результатов $R_{НИРОКР}$ в характеристики изделия $X_{И}$; $\varphi_{ТПП}$ – отображение (преобразование) на этапе ТПП характеристики изделия $X_{И}$ в характеристики $X_{\Phi ПС_{ИЗ}}$; $\varphi_{МТС}$ – отображение (преобразование) на этапе МТС характеристики $X_{\Phi ПС_{ИЗ}}$ в характеристики используемых ресурсов $X_{Р}$.

Комплекс технических средств представляет собой совокупность, взаимосвязанных единым управлением технических средств сбора, накопления, обработки, передачи, вывода и представления информации при решении задач проектирования. КТС составляют: средства программной обработки данных, подготовки и ввода, отображения и документирования, архива проектных решений, передачи данных.

Средства программной обработки данных представлены процессорами и запоминающими устройствами, т.е. персональными компьютерами (ПК), в которых реализуются преобразования данных и

программное управление вычислениями. Средства подготовки, ввода, отображения и документирования данных служат для общения пользователя с ПК. Средства архива проектных решений представлены внешними запоминающими устройствами - серверами. Средства передачи данных (сеть) используются для организации связей между территориально разнесенными ПК.

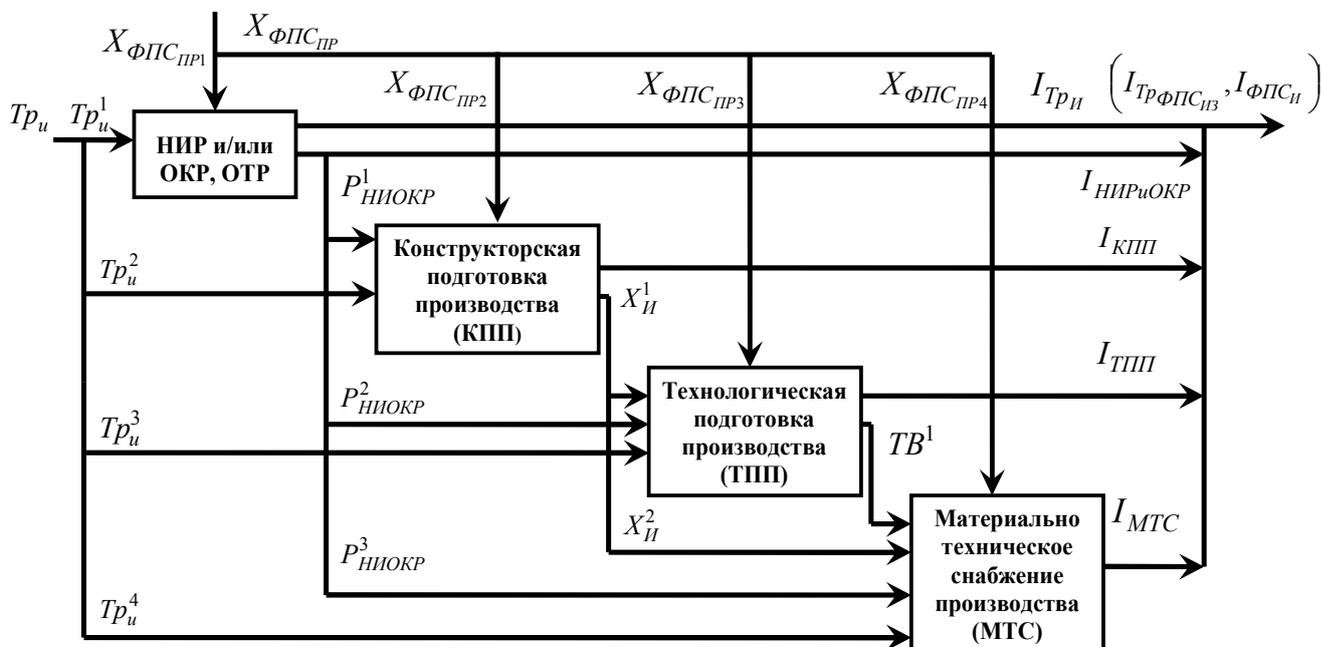


Рисунок 4 – Структурная схема взаимодействия процессов проектирования и разработки продукции производственно-технического назначения:

$X_{ФПС_{ПР}}$ - характеристики функциональной подсистемы проектирования (характеристики соответственно $\Phi П_{КТС}$, $\Phi П_{ПО}$, $\Phi П_{ОП}$); $X_{ФПС_{ИЗ}}$ - характеристики функциональной подсистемы изготовления изделия; $I_{ФПС_{И}}$ - информация, о характеристиках функциональной подсистемы изделия; $I_{Тр_П}$, $I_{НИР\ и\ ОКР}$, $I_{КПП}$, $I_{ТПП}$, $I_{МТС}$ - множество характеристик $X_{ФПС_{ИЗ}}$, $X_{ФПС_{И}}$, сформулированных в ТЗ и реализованных на этапах НИОКР, КПП, ТПП, МТС; Tr_u^1 , Tr_u^2 , Tr_u^3 , Tr_u^4 – множество требований к изделию, которые должны быть реализованы соответственно на этапах НИР и/или ОКР, КПП, ТПП, МТС; $P^1_{НИОКР}$, $P^2_{НИОКР}$, $P^3_{НИОКР}$ - результаты НИР и/или ОКР используемые соответственно на этапах КПП, ТПП, МТС; $X^1_{И}$, $X^2_{И}$ – множество данных КПП необходимых для ТПП, изготовления, контроля, приемки, поставки, эксплуатации изделия, включая ремонт; TB^1 - множество данных, которые определяют технологические воздействия при изготовлении изделия.

К настоящему времени сложились две основные формы организации технического обеспечения (формы использования технических средств): централизованная и частично или полностью децентрализованная. Централизованное техническое обеспечение базируется на использовании в информационной системе серверов баз данных и приложений. Децентрализация технических средств предполагает реализацию функциональных подсистем на ПК непосредственно на автоматизированных рабочих местах (АРМ). Перспективным принято считать частично децентрализованный подход - организацию технического обеспечения на базе распределенных сетей, состоящих из ПК и серверов для хранения баз данных, общих для любых функциональных подсистем (рис. 5.)

Согласно [13] программное обеспечение - совокупность программ системы обработки информации и программных документов, необходимых для их эксплуатации. Комплекс программ обеспечивает обработку или передачу данных и предназначен для многократного использования и применения разными пользователями. По видам выполняемых функций программное обеспечение подразделяется на общее и специальное.

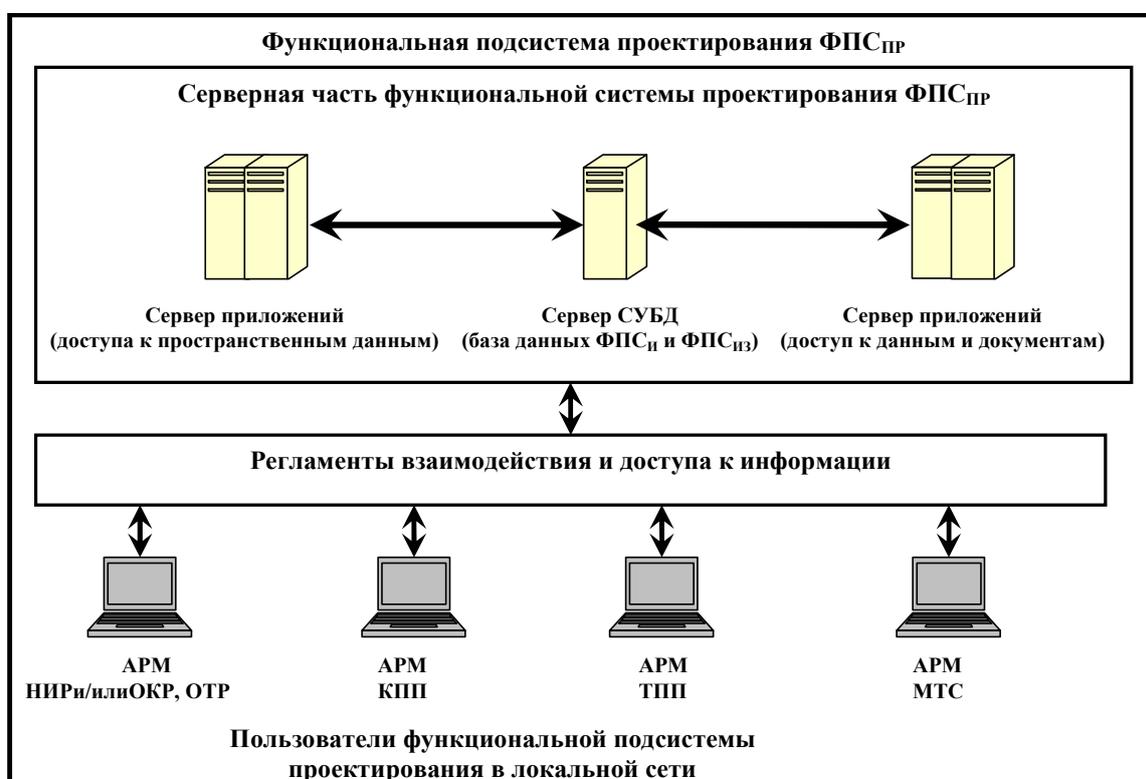


Рисунок 5 – Организационная схема функциональной подсистемы проектирования ФПС_{пр} изделия

Организационная схема функциональной подсистемы проектирования ФПС_{пр} содержит (рис.5): серверную часть (сервер СУБД с необходимыми серверами приложений), регламенты взаимодействия и доступа к информации и пользователей ФПС_{пр} в локальной сети с автоматизированными необходимыми АРМ для получения результатов по НИР и/или ОКР, ОТР, КПП, ТПП, МТС и др.

Общее ПО представляет собой совокупность программных средств, предназначенных для организации вычислительного процесса и решения, часто встречающихся задач обработки информации, которые разработаны вне связи с данной автоматизированной системой. Оно служит для расширения функциональных возможностей ПК, контроля и управления процессом обработки данных.

Специальное программное обеспечение представляет собой совокупность программ, разработанных при создании данной САПР.

Оперативный персонал САПР включает пользователей технических средств и программного обеспечения: конструкторов, технологов и эксплуатационный персонал, которые реализуют обслуживание КТС и ПО.

При этом формируется единое информационное пространство, в котором может создаваться и поддерживаться электронная модель изделия на протяжении всего его ЖЦ, причем процесс создания изделия охватывает параллельное проектирование и конструкции, и технологии, что позволяет совместить все работы на этапах КПП, ТПП и МТС. При автоматизированном проектировании обязательно используется все программно-алгоритмическое обеспечение. Базы данных ФПС_и и ФПС_{из} используются как разработчиками основного изделия, так и разработчиками поставщиков компонентов.

Базы данных разработок существуют в форме компонентов у поставщиков и/или в форме концепций уже реализованных ранее на самом предприятии.

На этапе изготовления информация (интегрированный результат процессов КПП, ТПП и МТС), содержащаяся в конструкторской и технологической документации, посредством технологических воздействий преобразуется в характеристики изделия.

Выводы. Предложена модель формирования характеристик машиностроительной продукции производственно-технического

назначения, работающая в автоматизированном режиме на этапе проектирования и разработки, которая с помощью функциональной подсистемы учитывает влияние уровня технического и программного обеспечения, а также изменения показателей оперативного персонала при реализации множества функций изделия на всех этапах его жизненного цикла. Рассмотрена взаимосвязанная цепочка процессов конструкторской, технологической подготовки производства и материально-технического снабжения в рамках постоянно совершенствуемых интегрированных информационных технологий.

Список литературы: 1. *Левин А.И., Судов Е.В.* Управление конкурентоспособностью наукоемкой продукции на основе современных информационных технологий // Технологические системы, №2, 2005. – С. 28-41. 2. *Залого 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 „ХПР”, 2009. – С. 251 – 260. 3. *Верезуб Н.В., Козакова Н.В., Крыжний Г.К., Федорович В.А.* Пути обеспечения качества на этапе разработки продукта // Сучасні технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. – Вип. 3 – Харків: НТУ „ХПР”, 2009. – С. 225 – 230. 4. *Луцкий С.В.* Теоретико-информационный подход к развитию технических систем // Вестник двигателестроения. Научно-технический журнал. – Запорожье, ОАО «Мотор Сич», 2007. - №2. С. 28-33. 5. *Вилисова И.В.* Управление конкурентоспособностью продукции машиностроительных предприятий (на примере энергетического машиностроения) // 08.00.05 диссертация на соискание ученой степени кандидата экономических наук. М.: 2005г. 6. *Олейник А.В.* Повышение срока службы изделий машиностроения на основе ситуационного управления процессами сопровождения их жизненного цикла: дис... доктора техн. наук: 05.13.06 / Олейник Андрей Владимирович. – Москва., 2006. – 362 с. 7. *Туркин В.Г., Герасимов Б.И., Жариков В.Д.* Качество машиностроительной продукции / Под науч. ред. Б.И. Герасимова. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2005. 104с. 8. *Трифонов О.Н.* Обеспечение качества машин на стадии проектирования// Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2004. №1, С. 3-8. 9. *Васильев В.А., Кирилянчик Л.А.* Управление качеством процессов проектирования конкурентоспособных изделий / Технология машиностроения. 2006. №8, С.81-83. 10. ДСТУ 3278-95 Система розроблення та поставлення продукції на виробництво. Основні терміни та визначення. 11. ГОСТ 15.001-88 Система разработки и постановки продукции на производство. Продукция производственно-технического назначения. 12. ДСТУ 2226-93 Автоматизовані системи. Терміни та визначення. 13. ГОСТ 19781-90 Обеспечение систем обработки информации программное. Термины и определения.

В. П. ЗУБАРЬ, канд. техн. наук, **А. Г. ТИМЧУК**, канд. техн. наук,
М. В. ЧОПЕНКО, Харьков, Украина

ЛЕЗВИЙНАЯ ОБРАБОТКА ЗАКАЛЕННЫХ СТАЛЕЙ И ЧУГУНОВ ВЗАМЕН ШЛИФОВАНИЯ.

Розглянуті особливості точіння деталей з загартованих сталей та чавунів замість процесу шліфування. Показані переваги лезової обробки.

Рассмотрены особенности точения деталей из закаленных сталей и чугунов вместо процесса шлифования. Показанные преимущества лезвийной обработки.

The peculiarities of cutting of steel and cast iron parts had been observed. The advantages of blade processing over grinding had been shown.

Появление в промышленности группы новых инструментальных материалов, таких, как сверхтвердые материалы (СТМ) на основе алмаза и нитрида бора позволило внести существенные изменения в металлообработку. И хотя прошло уже немало времени с начала внедрения этого инструмента в промышленность интерес к нему не только не ослабевает, но с каждым годом усиливается. Как показывает опыт ни один новый инструментальный материал не вызывает сегодня такой интерес у промышленности, как сверхтвердые материалы. Это связано, в первую очередь с тем, что они имеют уникальные физико-механические свойства, значительно отличающиеся от традиционных инструментальных материалов, что позволило получить принципиально новые результаты в материалообработке. С другой стороны режущие инструменты из этих материалов хорошо отработаны всеми известными инструментальными фирмами, что позволило обеспечить их высокую производительность и надежность в работе. Нельзя не отметить и тот определенный вклад в науку, и практику резания инструментом из сверхтвердых материалов, какой, одними из первых, внесли работы ученых ХПИ.

Лезвийная обработка инструментами на основе СТМ, как показали исследования, характеризуется рядом особенностей, предопределенных уникальными физико-механическими свойствами этих материалов. Так для инструментов на основе алмаза это высокие твердость, теплопроводность,

модуль упругости, износостойкость, низкий коэффициент трения. Причем в сравнении с традиционным инструментом эти характеристики наивысшие.

Для инструментов на основе нитрида бора твердого эти характеристики несколько уступают алмазному инструменту, но по таким показателям, как теплостойкость и прочность особенно ударная, эти инструменты превосходят алмазные. Так, если теплостойкость алмазных инструментов не превышает 700°C , то для инструментов на основе нитрида бора этот порог почти в два раза выше, что существенно расширяет возможности этого инструмента. При этом наивысшая работоспособность этого инструмента проявляется при достаточно высоких температурах в зоне резания.

К особенностям алмазного инструмента кроме низкого коэффициента трения с многими материалами следует отнести и высокую остроту режущей кромки (малый радиус округления). Это обеспечивает в сочетании с низким коэффициентом трения малую деформацию срезаемого слоя и обработанной поверхности, что приближает процесс алмазной обработки к условиям чистого среза. Малая деформация при высокой теплопроводности алмазного инструмента не способствуют развитию высоких температур в зоне резания. Поэтому процесс лезвийной обработки цветных металлов, пластмасс и ряда других материалов алмазными резцами можно условно назвать «холодным», так как температура в зоне резания практически не превышает 200°C . Низкий уровень температур позволяет производить обработку, которая характеризуется отсутствием температурных превращений в обработанной поверхности, максимально сохраняя структуру основы, что часто очень важно. Отсутствие температурного влияния на обработанную поверхность позволяет снизить и влияние скорости резания на качество обработки и получать лезвийным инструментом такие показатели качества, которые ранее обеспечивала абразивная обработка и даже превзойти их. При этом алмазная обработка инструментом из синтетических алмазов позволяет обеспечить шероховатость обработанной поверхности $Ra \approx 0,2 \text{ мкм}$, а инструментом из природных алмазов $Ra \approx 0,1 - 0,05 \text{ мкм}$.

Как показывает опыт в подавляющем числе случаев производительность лезвийной обработки выше, а ее себестоимость ниже, чем абразивной. Так замена шлифования точением при изготовлении резьбовых сопряжений из стеклопластиков повышает производительность обработки в несколько раз при значительном улучшении качественных и прочностных характеристик полученных сопряжений. Алмазное

фрезерование труднообрабатываемых, высоко абразивных материалов таких, как стеклопластики, углепластики, пластическая керамика и др. многократно производительнее шлифования.

Особенно перспективным является замена процесса шлифования лезвийной обработкой инструментами из СТМ на основе нитрида бора при обработке деталей из закаленных сталей и чугунов. Точение деталей из закаленных сталей резцами из нитрида бора твердого на производстве иногда называют «твердым точением». Здесь преимущества лезвийной обработки проявляются наиболее полно. Для подробного анализа преимуществ лезвийной обработки рассмотрим схемы резания при шлифовании, точении и растачивании Рис 1 и Рис. 2.

Как видно из рисунка, на котором показана схема обработки вала шлифованием и точением, площадь контакта шлифовального круга с деталью значительно превышает площадь контакта резца с деталью. Это превышение составляет десятки или даже сотни раз. В связи с этим работа резания и тепловыделение при шлифовании значительно больше, чем при точении. Таким образом локальность контакта инструмента с деталью при лезвийной обработке и, следовательно, локальность приложения высокой температуры к обработанной поверхности является отличительной особенностью точения и фрезерования в сравнении со шлифованием. Если сравнить длину контакта круга и резца с обрабатываемой деталью в направлении вектора скорости резания то можно увидеть, что при точении она существенно меньше. Скорость (окружная) детали при шлифовании меньше, чем при точении и, следовательно, время воздействия высокой температуры на поверхность детали при шлифовании больше, чем при точении. Поэтому еще одной особенностью процесса точения в сравнении со шлифованием является кратковременность воздействия высокой температуры на обработанную поверхность. Так время воздействия высокой температуры при точении на очень малую поверхность детали менее 0,0001 сек.

Таким образом, локальность и кратковременность воздействия высокой температуры на поверхность детали при лезвийной обработке являются гарантией того, что высокая температура не проникает на большую глубину и не «успевает» произвести существенные фазово-структурные изменения в поверхностном слое детали. Так, если на поверхности детали при точении резцами из нитрида бора закаленной стали температура достигает 1200°C , то, как показывают исследования, на глубине 10 мкм от поверхности она не превышает 100°C .

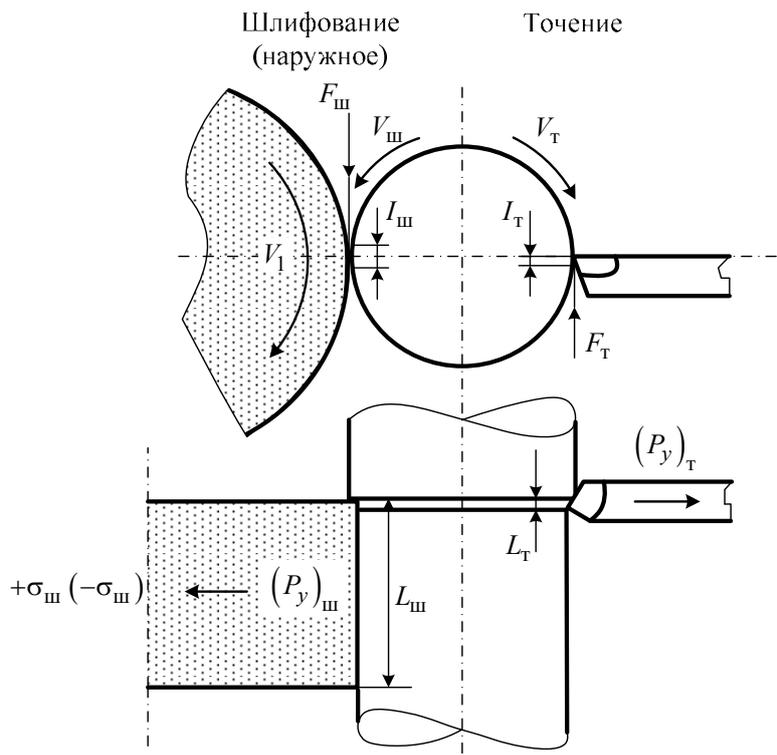


Рисунок 1 – Схема контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью при шлифовании и точении:

$$V_{ш} < V_T; I_{ш} > I_T; L_{ш} \gg L_T; F_{ш} > F_T; T_{ш} > T_T; N_{ш} > N_T; A_{ш} > A_T; E_{ш} > E_T$$

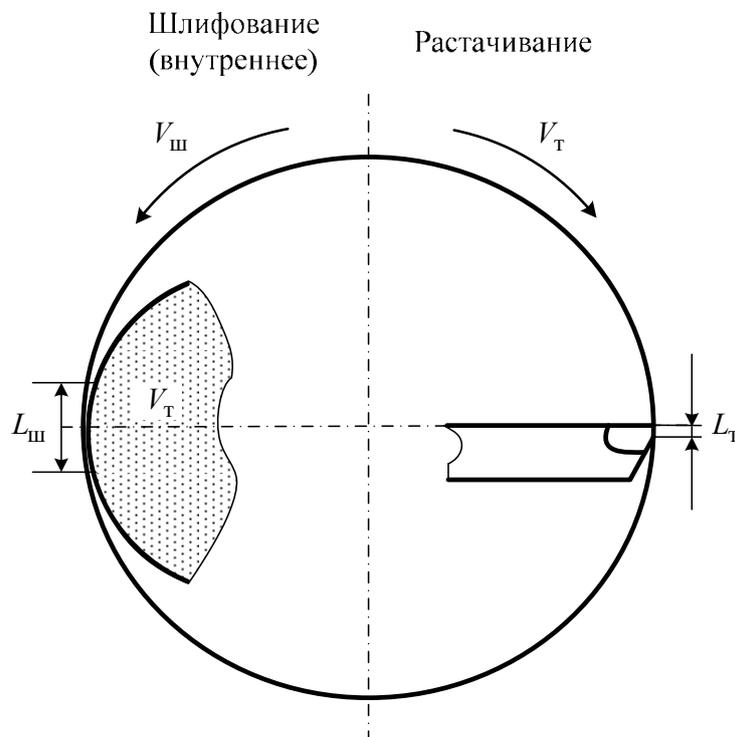


Рисунок 2 – Схема контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью при внутреннем шлифовании и растачивании:

$$V_{ш} < V_T; L_{ш} < L_T; T_{ш} > T_T; A_{ш} > A_T; E_{ш} > E_T$$

Следовательно, высокие температуры, которые имеют место при точении из-за локальности и кратковременности их воздействия в очень тонких слоях детали, с учетом огромных градиентов могут приводить к аморфизации тончайшего поверхностного слоя детали, чему способствует контакт с таким интенсивным аморфизатором, каким является нитрид бора.

Как известно, наличие тонкой аморфной пленки на обработанной поверхности детали повышает эксплуатационные характеристики последней.

При сравнении внутреннего шлифования и растачивания преимущества лезвийной обработки проявляются еще ярче, так как величина контакта шлифовального круга здесь больше, чем при наружном шлифовании Рис. 2.

И, следовательно, теплонапряженность процесса выше. При внутреннем шлифовании из-за малого диаметра круга и малой длины его поверхности он изнашивается быстрее, что так же повышает теплонапряженность процесса резания.

Если сравнить характеристики качества обработанной поверхности при шлифовании и точении, то можно увидеть, что по таким критериям, как шероховатость точение не уступает шлифованию. Так при точении закаленных сталей резцами из нитрида бора можно обеспечить шероховатость $R_a = 0,3-0,4$ мкм. А за счет изменения геометрии лезвийного инструмента можно обеспечить и меньшую шероховатость. По такому критерию шероховатости, как относительная опорная длина профиля t_p шлифование уступает точению. Сравнение остаточных напряжений в поверхностных слоях обработанной поверхности после шлифования и точения показывает, что лезвийная обработка стабильно обеспечивает получение благоприятных сжимающих напряжений в то время, как шлифование - неблагоприятных растягивающих.

Следует отметить, что при точении полностью отсутствуют прижоги, микро и макро трещины в обработанной поверхности. Фазово-структурные изменения в подповерхностном слое при точении минимальны, шаржирование поверхности отсутствует.

Рассмотренные преимущества процесса точения в сравнении со шлифованием иногда игнорируются под тем предлогом, что процесс шлифования производительнее, чем точение. Но всегда ли шлифование производительнее процесса точения? Как показывает анализ сравнения вариантов обрабатываемых поверхностей шлифование далеко не всегда производительнее точения. Так внутреннее шлифование особенно поверхностей малых диаметров многократно проигрывает процессу

расточивания и только при обработке больших диаметров процессы сопоставимы. При замене шлифования на точение при обработке многих деталей из закаленной стали многократные преимущества образуются не только за счет меньшего машинного времени, но и за счет экономии вспомогательного времени. Возможность изготовления на одном станке, ликвидируя обработку на шлифовальном станке – значительно сокращает цикл обработки.

Как показывает опыт работы, особенно зарубежный, сегодня все больше деталей из закаленных сталей обрабатываются лезвийным инструментом, а не абразивным. При этом перспективно не только точение, но и фрезерование. Так, фрезерование чугуновых направляющих металлорежущих станков обеспечивает высокое качество при очень высокой производительности ($V \approx 900$ м/мин. при минутной подаче $S_{\text{мин}} \approx 200-600$ мм/мин) при практически полном отсутствии тепловых деформаций.

Еще одно преимущество выгодно отличающее лезвийную обработку от шлифования – возможность отказаться от применения смазочно-охлаждающих жидкостей СОЖ. Так лезвийная обработка инструментами из синтетических сверх твердых материалов широкой гаммы обрабатываемых материалов, в том числе закаленных сталей и чугунов производится, как правило, без применения СОЖ, что значительно улучшает экологические показатели. Однако, если применение СОЖ допустимо в процессе обработки, то повышается и стойкость инструмента и оптимальная скорость обработки.

Сравнение процесса шлифования с лезвийной обработкой было бы не полным без сопоставления энергетических затрат этих процессов.

Как показывает анализ энергозатрат этих процессов, шлифование является более затратным, причем практически всегда, так как удельная работа резания и мощность, всегда больше при шлифовании. Учитывая актуальность энергозатратных подходов в оценке процесса механообработки, вывод о том, что лезвийная обработка менее энергозатратная, является весьма важным.

Таким образом сравнительный анализ процессов шлифования и лезвийной обработки позволяет сделать вывод о определенных преимуществах последнего перед первым.

Анализируя причины недостаточно интенсивного перехода к процессу лезвийной обработки взамен шлифования там, где это целесообразно, можно сделать вывод о информационном вакууме. Очень мало работ с глубоким и подробным анализом границ и условий эффективного применения лезвийной обработки. В то же время традиционный подход к шлифованию, как окончательному методу обработки часто мешает увидеть и оценить преимущества лезвийной

обработки инструментами из сверхтвердых материалов выгодно отличающие процесс лезвийной обработки от абразивной.

Одной из причин оказавших существенное влияние на широкое внедрение лезвийной обработки закаленных сталей инструментом из сверхтвердых материалов на основе нитрида бора твердого является особенность износостойкости этого инструмента. Как показали исследования, наивысшая работоспособность этого инструмента связана с высокими температурами в зоне резания ($T_1 - T_2$), а, по этому, находится в сравнительно узком диапазоне скоростей резания соответствующему этим высоким температурам Рис 3. Поскольку высокая износостойкость-работоспособность резцов из нитрида бора твердого реализуется в полной мере в сравнительно узком диапазоне скоростей резания ($V_1 - V_2$),

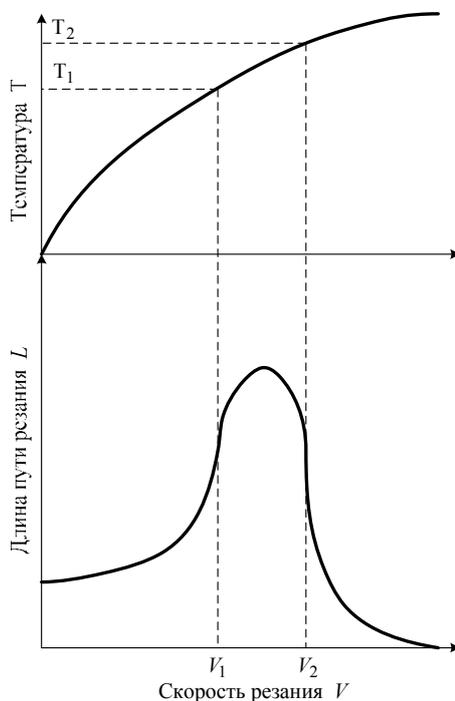


Рисунок 3 – Зависимость длины пути резания и температуры резания от скорости резания

то выход за границы этого оптимального диапазона скоростей резания приводит к интенсивному износу режущего инструмента, что делает процесс лезвийной обработки не эффективным. Причем, что очень важно, работа с малыми скоростями резания (скоростями ниже оптимальных) сопровождается низкой стойкостью режущего инструмента, более низкой, чем твердосплавного инструмента.

Таким образом, неправильно выбранный диапазон скоростей резания при точении закаленных сталей и чугунов резцами из нитрида бора твердого может не только не дать положительный эффект но и дискредитировать весьма прогрессивный инструмент.

Список литературы: 1. К вопросу о замене шлифования лезвийной обработкой. В сборнике "Высокие технологии: тенденции развития". Материалы XII международного семинара. Харьков НТУ ХПИ 2002 г. 2. Особенности применения лезвийных инструментов из сверхтвердых материалов. Сборник научных трудов «Современные технологии машиностроения» Харьков НТУ «ХПИ» 2006 г.

В. И. КАЛЬЧЕНКО, д-р техн. наук,

В. В. КАЛЬЧЕНКО, д-р техн. наук, Чернигов, Украина

УНИВЕРСАЛЬНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПРОДОЛЬНОГО КРУГЛОГО ШЛИФОВАНИЯ СО СКРЕЩИВАЮЩИМИСЯ ОСЯМИ ИНСТРУМЕНТА И ДЕТАЛИ

Розроблено універсальну високопродуктивну технологію поздовжнього круглого шліфування циліндричних, ступінчастих, конічних, торцевих та криволінійних поверхонь периферією і торцем одного вузького круга, зі схрещеними осями його та деталі. Підвищення продуктивності обробки забезпечується шляхом зняття чорнового припуску торцем круга в режимі однопрохідного глибинного високошвидкісного шліфування, а точності за рахунок чистового шліфування калібруючою розвантаженою ділянкою периферії круга.

Разработана универсальная высокопроизводительная технология продольного круглого шлифования цилиндрических, ступенчатых, конических, торцевых и криволинейных поверхностей периферией и торцом одного узкого круга, со скрещенными осями его и детали. Повышение производительности обработки обеспечивается путем снятия чорнового припуска торцом круга в режиме однопроходного глубинного высокоскоростного шлифования, а точности – за счет чистового шлифования калибрующим разгруженным участком периферии круга.

The high velocity universal technology of traverse grinding for the external, cylindrical, gradative, conical, facing and quadratic curve surfaces by periphery of the same straight wheel with the crossed axes of abrasive instrument and processed detail was developed. The productivity increase was reached by high-speed metalcutting rough allowance to the face end of the grinding wheel.

В современном машиностроении широко используются детали с высокоточными цилиндрическими, коническими, торцевыми и криволинейными поверхностями, окончательное качество которых определяется операциями круглого шлифования. При изготовлении широкого класса этих деталей машин, необходимо с одной стороны выдерживать высокие требования по качеству получения геометрических размеров, шероховатости и физико-механического состояния поверхностного слоя, с другой стороны повышать производительность их выпуска в связи с требованиями рынка.

Получение высокого качества изделий с высокой производительностью и гибкостью производства возможно с использованием универсальных технологий круглого шлифования на станках с ЧПУ. Известно, что внедрение операций шлифования на станках с ЧПУ отстает, например, от операций фрезерования. Главной причиной этого есть низкая стойкость профиля абразивного инструмента, в особенности при шлифовании криволинейных поверхностей, и нестабильность положения формообразующего участка круга из-за его износа. Итак, разработка и исследование универсальной высокопроизводительной технологии продольного круглого шлифования цилиндрических, ступенчатых, конических, торцовых и криволинейных поверхностей одним инструментом с разгруженным формообразующим участком является актуальной задачей.

В настоящее время существует несколько основных технологических схем продольного круглого шлифования. Наиболее распространенным является многопроходное шлифование периферией цилиндрического круга [1]. При продольной подаче S_0 на оборот детали, которая равняется высоте B круга, данный метод является высокопроизводительным, но малоточным, поскольку неравномерность износа круга искажает его форму и, следовательно, образующую детали. При подаче детали $S_0 = (0,1 \dots 0 \dots 0,2) \cdot B$ – точность повышается, но снижается производительность. К недостаткам этого способа шлифования относится также то, что формообразующий участок периферии круга не имеет стабильного осевого положения и перемещается вдоль оси вследствие износа круга.

Для повышения производительности при сохранении точности применяется способ глубинного однопроходного шлифования кругом с заборным конусом [2]. При изменении припуска на обработку заборный конус задействован не полностью, что приводит к снижению производительности обработки. При этом припуск, который снимается за оборот детали, остается постоянным, что не разгружает формообразующий участок круга. То есть, этот метод не является универсальным и, как следствие, используется в массовом производстве.

С целью фиксации формообразующего участка круга, что повышает точность и упрощает разработку управляющих программ для шлифования на станках с ЧПУ, предложен способ [3] и технология [4], где шлифование выполняется широким абразивным цилиндрическим кругом со скрещивающимися осями его и детали (рис. 1).

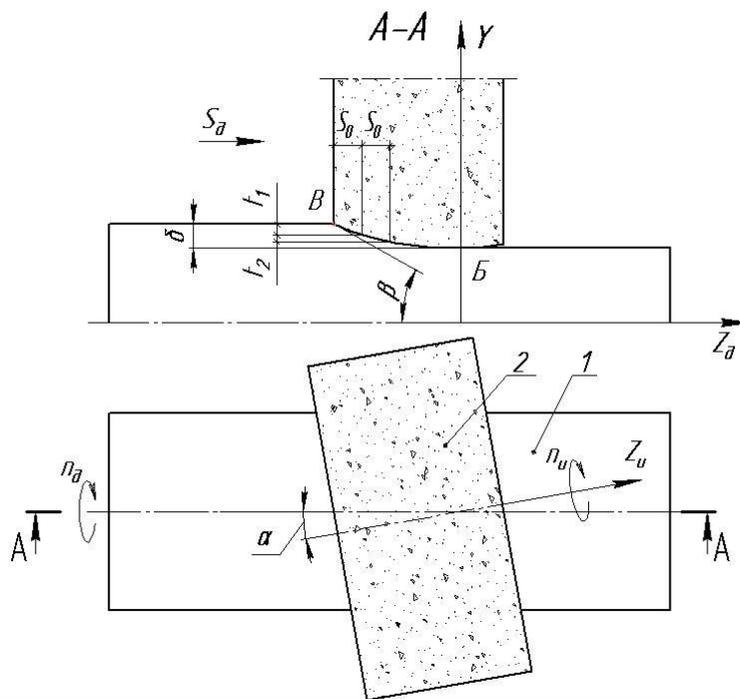


Рисунок 1 – Шлифование широким цилиндрическим кругом со скрещивающимися осями его и детали

Если повернутый круг 2 (рис. 1) рассечь плоскостью, которая проходит через ось вращения детали 1, то получим образующую круга в форме эллипса. Угол поворота α выбирают таким, чтобы входная кромка круга В совпала с припуском δ на обработку. Данный способ дает возможность при обработке деталей с разными припусками использовать всю периферию круга, что повышает производительность. При этом, при приближении к формообразующему участку Б, который совпадает с осью поворота круга γ , угол β наклона касательной в текущей точке эллиптического профиля и припуск t_β , который снимается за оборот детали, уменьшаются, что разгружает участок Б ($t_2 < t_1$) и повышает точность обработки. Это дает возможность одновременно выполнять черновое шлифование в начале профиля В круга, затем, в процессе осевого перемещения детали относительно круга, чистовое шлифование и выхаживание на формообразующем участке Б. Этот способ используется при обработке жестких крупногабаритных деталей [4], например прокатных валков. Недостатком этого способа является также сложность обработки ступенчатых деталей.

Фирма Yunker (Германия) усовершенствовала способ [3] тем, что сьем чернового припуска из периферии круга вынесла на его торец [5], а чистовое шлифование и формообразование оставила как в способе [3]. Известно, что Yunker при использовании метода шлифования со

скрещивающимися осями круга и детали на станках Quickpoint 1001 и Quickpoint 1002 достигла повышения производительности шлифования в 5-6 раз [5] в сравнении с традиционным маятниковым шлифованием [1]. Но неизвестны причины такого возрастания производительности. Как видно из вышесказанного, методы шлифования со скрещивающимися осями шлифовального круга и детали имеют неиспользованные резервы, а возможность повышения производительности обработки в несколько раз подчеркивает актуальность этого направления.

Целью данной работы является повышение производительности и точности обработки, а также гибкости производства, за счет внедрения разработанного способа [6] и на его базе универсальной технологии продольного круглого шлифования цилиндрических, ступенчатых, конических, торцовых, криволинейных поверхностей, а также переходных канавок и радиусных сопряжений периферией и торцом одного узкого круга со скрещивающимися осями его и детали.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи.

Разработать математическую модель производительности нового способа [6] шлифования и выполнить ее исследование в зависимости от угла α (рис. 2) скрещивания осей детали 1 и инструмента 2, их геометрических параметров и режимов шлифования.

Вывести аналитическую зависимость для получения рационального угла ориентации круга относительно детали.

Предложить циклы шлифования новым способом цилиндрических, ступенчатых, конусных и криволинейных поверхностей с целью их использования при разработке управляющих программ для станков с ЧПУ.

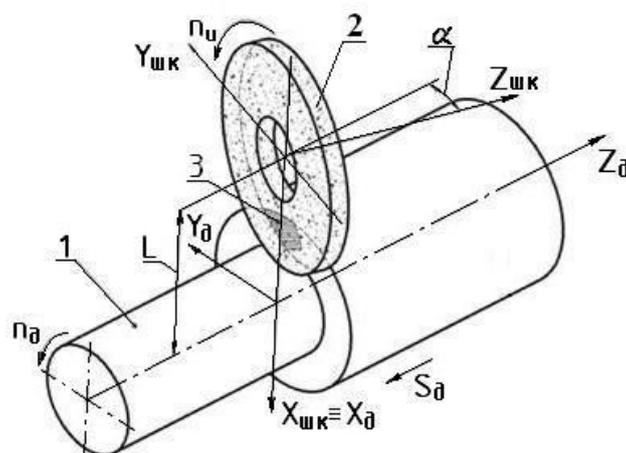


Рисунок 2 – Схема шлифования торцом и периферией круга

Расчет производительности шлифования со скрещивающимися осями детали и круга выполнен по методике, изложенной в работах [7, 8],

при этом, впервые определена непрерывная мгновенная линия и пятно контакта круга и детали, как на его торце так и на периферии. Схема процесса шлифования (рис. 2) включает шлифовальный круг 2, который повернут вокруг оси X на угол α ; деталь 1 и пятно контакта 3.

Математическое моделирование производительности шлифования проведено с использованием программного пакета MathCAD 13. Для определения мгновенной линии контакта круга 2 и детали 1 необходимо записать радиус – вектор поверхности круга

$$S_{hK}(u, i) = A4(\alpha) \cdot A1(-L) \cdot A3(Z_{ShK}(i)) \cdot A6(u) \cdot A1(R_{ShK}(i)) \cdot \bar{e}_4, \quad (1)$$

где $A1...A6$ – матрицы преобразования систем координат, которые моделируют сдвиги и повороты вдоль и вокруг осей X, Y, Z [9]; i – координата вдоль профиля круга; u – круговая координата; $Z_{ShK}(i)$ – зависимость высоты круга от координаты i на профиле; $R_{ShK}(i)$ – зависимость радиуса круга от координаты i на профиле; L – межосевое расстояние; α – угол ориентации круга.

Точки линии контакта определяются из условия

$$\bar{n} \cdot \bar{V}_k = 0, \quad (2)$$

где \bar{n} – единичный вектор нормали к поверхности круга 2 (рис. 2); \bar{V}_k – вектор скорости относительного движения круга в системе координат детали 1.

Вектор нормали равняется векторному произведению векторов, касательных к поверхности круга. Для их нахождения необходимо дифференцировать радиус-вектор (1) поверхности круга по обеим параметрам i и u . Для нахождения вектора \bar{V}_k относительной скорости необходимо перенести вектор (1) в систему координат детали и дифференцировать его по времени (по углу поворота вокруг оси детали).

$$S_{hKv}(u, i) = A3(p \cdot \theta) \cdot A4(\theta) \cdot A4(\alpha) \cdot A1(-L) \cdot A3(S_{ShK}(i)) \cdot A6(u) \cdot A1(R_{ShK}(i)) \cdot \bar{e}_4, \quad (3)$$

где θ – угловой параметр, который определяет положение круга в системе координат детали; p – параметр винтового движения.

Линия контакта начинается на периферии круга и заканчивается на его торце. Поворачивая линию контакта вокруг оси детали получим ее поверхность.

Пятно контакта ограничено линией контакта, а также линиями пересечения шлифовального круга и заготовки, смещенной на величину подачи на оборот.

На рис. 3 показанная зона обработки, где 1 – линия пересечения шлифовального круга и торца заготовки; 2 – линия пересечения внешнего цилиндра заготовки и шлифовального круга; 3 – линия контакта; 4 – деталь; 5 – шлифовальный круг; 6 – пятно контакта.

На рис. 4, показан профиль детали в точке Б (рис. 1) формообразования.

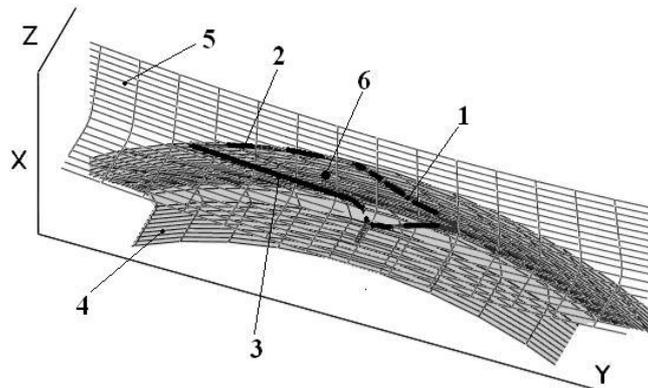


Рисунок 3 – Зона обработки

В связи с поворотом круга на угол α , при шлифовании получается геометрическая шероховатость, которую можно определить как разность высоты профиля детали в точке поворота круга и точке, удаленной на половину подачи S_0 на оборот детали (рис. 5).

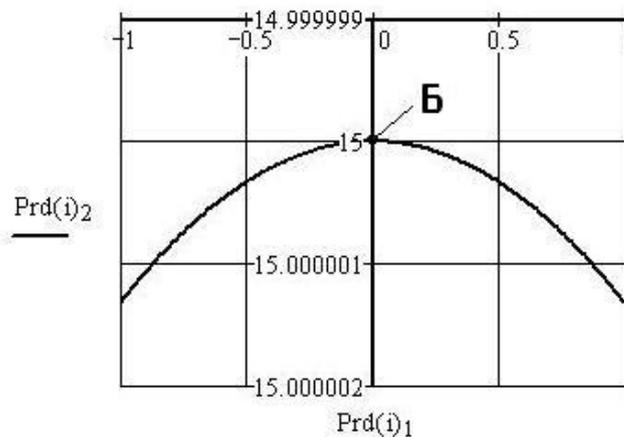


Рисунок 4 – Профиль детали в точке формообразования

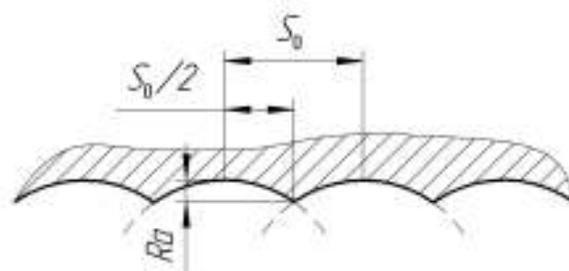


Рисунок 5 – Образование геометрической шероховатости

Расчетная величина геометрической шероховатости Ra_{geom} для следующих параметров: $R_{шк} = 100 \text{ мм}$ – радиус шлифовального круга (рис. 2); $n_{шк} = 2880 \text{ об/мин}$ – частота вращения шлифовального круга; $R_{\partial} = 15 \text{ мм}$ – радиус обработанной детали (рис. 2); $n_{\partial} = 200 \text{ об/мин}$ – частота вращения детали; $r = 0,5 \text{ мм}$ – радиус округления кромки шлифовального круга (рис. 6); $S_o = 0,1 \text{ мм/об}$ – продольная подача детали; $t = 2 \text{ мм}$ – глубина резания; равняется $Ra_{geom} = 0,331 \text{ мкм}$.

Удельная производительность шлифования определяется из выражения

$$Q(i) = \int_{uu1(i)}^{uu2(i)} Vn(u, i) \cdot R_{ShK}(i) du, \quad (4)$$

где $uu1(i)$ – углы входа круга в деталь; $uu2(i)$ – углы выхода круга из детали; $Vn(u, i)$ – произведение скорости относительного движения на единичную нормаль на поверхности круга в точке с координатами (u, i) .

На рис. 7 $i_{r \text{ поч}}$, $i_{r \text{ кин}}$ – координаты начала и окончания радиусной кромки (рис. 6).

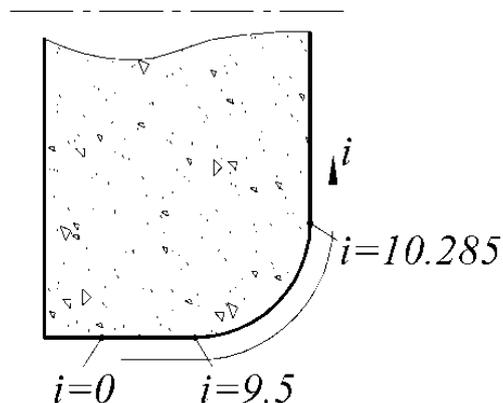


Рисунок 6 – Координата вдоль профиля круга

Задача оптимизации состоит в том, чтобы определить рациональный угол ориентации α круга относительно детали для получения максимальной производительности.

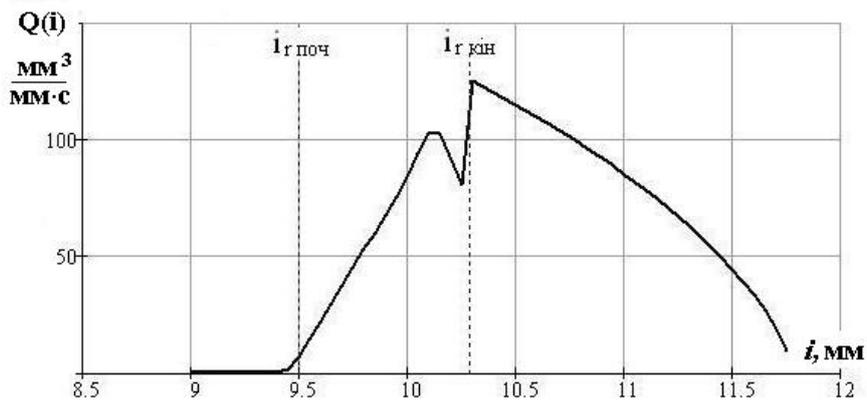


Рисунок 7 – Распределение удельной производительности шлифования по поверхности шлифовального круга

Линия контакта 3 и площадь пятна контакта 6 (рис. 3) могут занимать разное положение в зависимости от угла α ориентации круга (рис. 2).

Зависимость площади F пятна контакта от угла α ориентации круга приведена на рис. 8. Как видно из графика, существует некоторая неустойчивая область ($\alpha \approx -0,1^\circ$), в которой происходит резкое изменение площади контакта. Этот угол соответствует углу наклона винтовой линии относительного движения круга. При переходе через указанный угол линия контакта изменяет свое направление, которое и приводит к резкому изменению площади контакта. То есть, торец круга отходит от детали и в процессе снятия припуска участия не принимает.

На рис. 9 показан график влияния угла α ориентации круга на удельную производительность $Q(i)$ шлифования. По оси абсцисс отложена координата i вдоль профиля круга. Координата i показана на рис. 6.

На графике (рис. 9) $i_{r\text{ поч}}$, $i_{r\text{ кін}}$ – координаты начала и окончания радиусной кромки шлифовального круга; 1...4 – точки окончания соответствующих графиков.

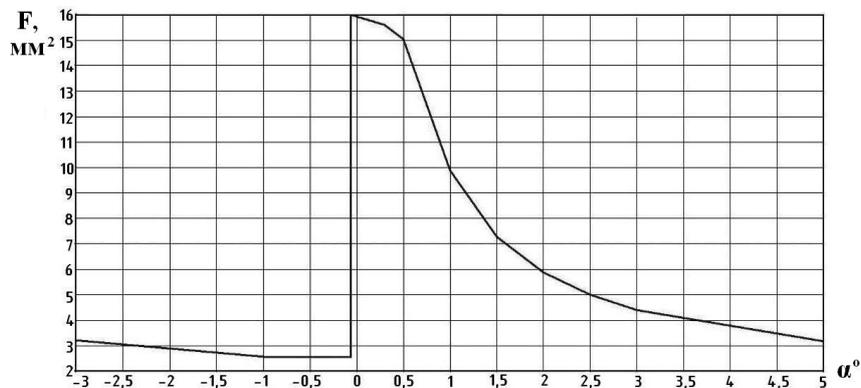


Рисунок 8 – Зависимость площади пятна контакта от угла ориентации круга

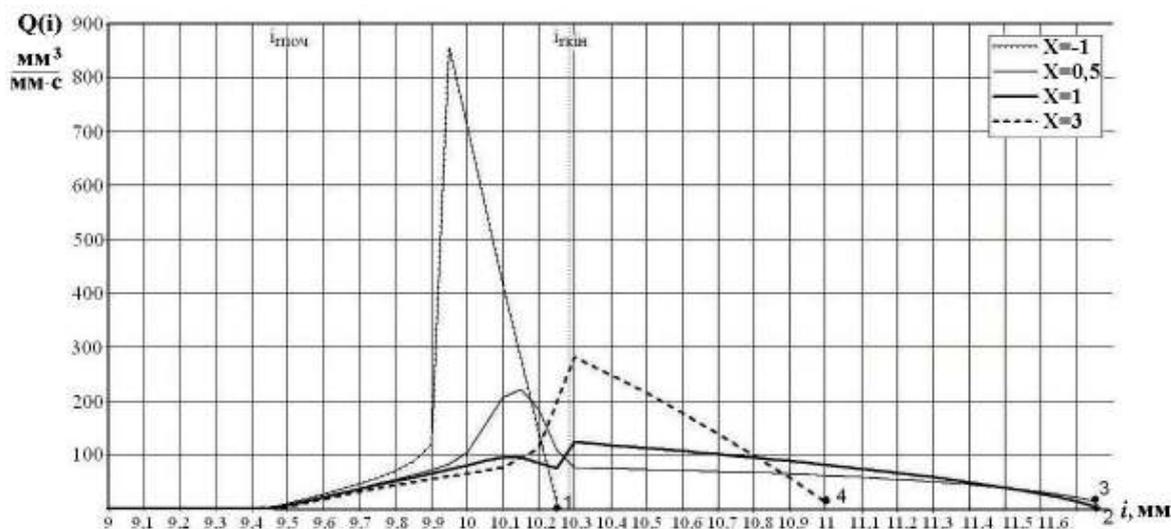


Рисунок 9 – Влияние угла ориентации круга на удельную производительность шлифования

То есть, область до $i_{r\text{поч}}$ отвечает периферии круга, от $i_{r\text{поч}}$ до $i_{r\text{кин}}$ – переходной округленной кромке, после $i_{r\text{кин}}$ – торцу круга. Графики приведены для четырех разных значений угла ориентации круга ($\alpha = -1^\circ, 0,5^\circ, 1^\circ, 3^\circ$). Точки 1, 2, 3, 4 показывают загруженность профиля круга при шлифовании. То есть, при угле $\alpha = -1^\circ$ торец круга совсем не загруженный, а припуск срезается исключительно переходной кромкой.

При переходе через критическое значение угла α резко увеличивается площадь пятна контакта (рис. 8) и, как следствие, загруженность торца круга (точка 3 на рис. 9). При дальнейшем увеличении угла α площадь пятна контакта уменьшается, но загруженность торца круга по высоте остается неизменной до значения угла $\alpha = 1^\circ$ (точки 2 и 3 имеют одинаковую абсциссу). Дальнейшее увеличение угла ориентации круга приводит к уменьшению загруженности торца круга (точка 4).

Оптимальный угол ориентации круга необходимо выбирать, исходя из следующих условий:

- площадь пятна контакта должна быть максимальной;
- удельная производительность шлифования должна быть равномерной вдоль профиля круга на черновом участке (торец круга) и минимальной на чистовом участке (периферия круга).

Выполнение этих требований обеспечит равномерный минимальный износ шлифовального круга и разгрузку калибрующего участка.

Как видно из рис. 9, наиболее рациональным есть угол ориентации круга $\alpha = 1^\circ$, при котором наблюдается наибольшая загрузка торца круга, практически плавное уменьшение удельной производительности на

переходной кромке от торца к периферии и разгруженную периферию. То есть, торец есть черновым участком и срежет основной припуск, переходная кромка – полуступичным участком, а периферия – чистовым и калибрующим.

Угол α , который отвечает указанным требованиям, находим из выражения

$$\alpha = S_0 \cdot \sqrt{\frac{R+r}{2 \cdot R \cdot r \cdot t}} \quad (5)$$

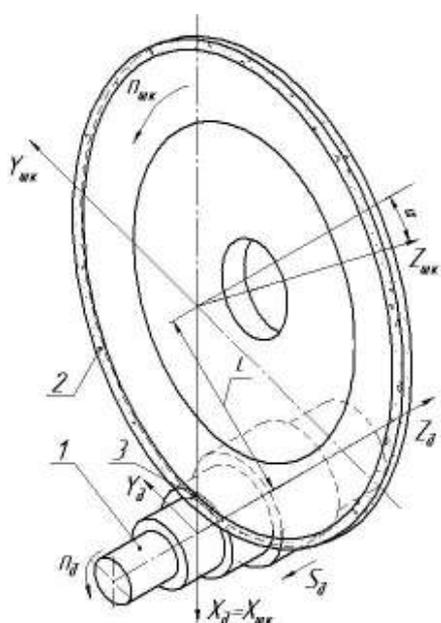


Рисунок 10 – Шлифование ступенчатой поверхности

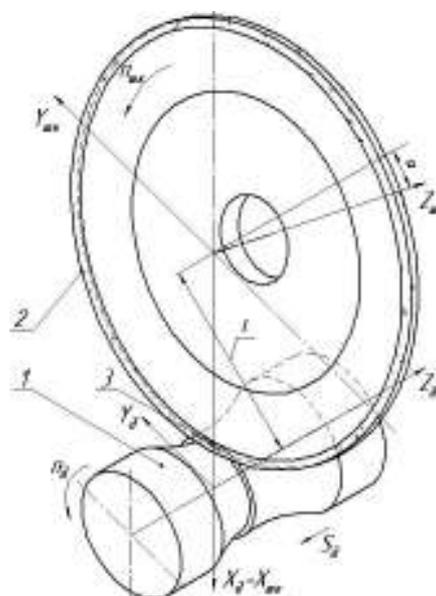


Рисунок 11 – Шлифование криволинейной поверхности

При использовании алмазных и эльборовых кругов с небольшой высотой (4-5 мм) на станках с ЧПУ предложенная технология является универсальной. Возможна практически полная обработка деталей типа вал с одной установки. То есть, одним кругом можно обрабатывать цилиндрические участки, торцы (рис. 10), криволинейные поверхности (рис. 11), конусы, канавки, радиусные сопряжения, что повышает гибкость производства. Проекция точки пересечения осей круга 2 (рис. 9-10) и детали 1 на ее осевую плоскость является базовой точкой при разработке циклов шлифования и управляющих программ для обработки на станках с ЧПУ.

Разработана универсальная технология продольного круглого шлифования, которая обеспечивает повышение производительности обработки за счет съема чернового припуска торцом круга в режиме однократного глубинного высокоскоростного шлифования, а точности за счет чистового шлифования калибрующим разгруженным участком периферии круга, так как суммарная сила резания при черновом шлифовании расположена параллельно оси детали.

Получена математическая модель производительности нового способа шлифования и выполнено ее исследование в зависимости от угла скрещивания осей детали и инструмента, их геометрических параметров и режимов шлифования. Повышение производительности шлифования по новой технологии в сравнении с традиционным продольным круглым шлифованием периферией круга в 2-3 раза.

Получено аналитическую зависимость для определения рационального угла ориентации круга относительно детали из условия получения максимальной производительности обработки при обеспечении необходимого качества.

В дальнейшем планируется исследование процесса шлифования разнообразных поверхностей со скрещивающимися осями детали и алмазного или эльборового кругов.

Список литературы: 1. *Маслов Е.Н.* Теория шлифования материалов. – М.: Машиностроение, 1974.–320с. 2. Патент №50 – 636 (Япония) кл. В24В 53/100,1976, *Тоёда Коки К.К.* Способ правки шлифовального круга. 3. Авторское свидетельство СССР № 1234163, кл. В24В 5/04, 1984, *В.И. Кальченко.* Способ круглого шлифования с продольной подачей. 4. *Кальченко В.И.* Научные основы шлифования криволинейных поверхностей с управляемой ориентацией абразивного инструмента/ Диссертация... докт. техн. наук/ – Чернигов, 1994. – 491 с. 5. Круглое шлифование на станках с ЧПУ. Quickpoint 1001 и Quickpoint 1002 (проспект фирмы Yunker mashinen), Erwin Yunker, 1991 – 16 с. 6. Рішення про видачу деклараційного патенту на корисну модель за заявкою №u200905574 В24В5/00 «Спосіб глибинного круглого шліфування зі схрещеними осями деталі і круга» /*Кальченко В.І., Кальченко В.В., Дмитренко М.А.* 2009 р. 7. *Кальченко В.В.* Наукові основи ефективного шліфування зі схрещеними осями абразивного інструменту та оброблюваної деталі /Дисертація...докт. техн. наук/ Чернігів, 2006. – 372 с. 8. *Кальченко В.І., Кальченко В.В., Дмитренко М.А.* Глибинне кругле шліфування зі схрещеними осями деталі і круга //Вісник Чернігівського державного технологічного університету.– Чернігів: ЧДТУ, 2009 – Вип. № 37. – с. 64-72. 9. *Портман В.Т., Решетов Д.Н.* Точность металлорежущих станков.–М., 1986. – 320 с.

Є. В. МИРОНЕНКО, д-р техн. наук,
В. В. КАЛІНІЧЕНКО, канд. техн. наук, Краматорськ, Україна

АНАЛІЗ ЗВ'ЯЗКІВ РЕЖИМІВ РІЗАННЯ ТА ПОПЕРЕДНЬОГО ЗМІЦНЕННЯ ТВЕРДОГО СПЛАВУ З ІНТЕГРАЛЬНИМ ЕНЕРГЕТИЧНИМ КРИТЕРІЄМ ПРИ ЧИСТОВОМУ ТОЧІННІ СТАЛЕЙ

У статті представлені основні теоретичні підходи до аналізу зв'язків інтегрального енергетичного критерію процесу різання при чистовій обробці сталей гострінням твердосплавним інструментом з режимами різання й попереднього зміцнення твердого сплаву.

В статье представлены основные теоретические подходы к анализу связей интегрального энергетического критерия процесса резания при чистовой обработке сталей точением твердосплавным инструментом с режимами резания и первичного замещения твердого сплава.

In the article the basic theoretical approaches of the forming of connections system of cutting process' integral power criterion with the cutting modes and strengthening modes of instrument at steels sharp turning are presented. The hard-alloy instrument is approved by previous strengthening influence.

Постановка проблеми

Неухильне збільшення питомої ваги чистової токарної обробки в структурі технологічних процесів виготовлення сталевих деталей-тіл обертання обумовлює актуальність розробки моделей для розрахунково-аналітичного визначення оптимальних режимів різання при чистовому точінні сталей різцями з твердосплавними пластинами. Враховуючи широке використання методів зміцнення та нанесення зносостійких покриттів для підвищення стійкості твердосплавного інструменту, особливо актуальною є розробка подібних моделей для твердосплавного інструменту, підданого попередньому зміцнюючому енергетичному впливу (ЗЕВ).

Універсальні теоретичні моделі для визначення оптимальних режимів різання повинні базуватись на розгляді процесу різання як комплексу взаємопов'язаних явищ, інтенсивність кожного з яких може бути виражена через єдиний інтегральний енергетичний критерій. Значна кількість взаємопов'язаних фізичних процесів при точінні сталей твердосплавним інструментом зі зміцненням або зносостійким покриттям та залежність інтенсивності їхнього протікання від режимів різання і властивостей поверхневого шару інструменту, набутих ним в результаті

ЗЕВ, вимагає всебічного аналізу системи зв'язків інтегрального енергетичного критерію процесу різання з режимами різання та ЗЕВ.

Аналіз досліджень та публікацій з проблеми, що розглядається

Розгляд процесу різання як комплексу взаємопов'язаних та взаємообумовлених фізичних явищ є загальною рисою робіт Ю. Г. Кабалдіна [1], В. С. Кушнера [2], О. Д. Макарова [3], С. С. Сіліна [4], В. К. Старкова [5], С. І. Тахмана [6], Л. Ш. Шустера [7], Ф. Я. Якубова [8] та інших. В якості параметрів, що обумовлюють інтенсивність фізичних явищ при різанні, в першу чергу – інтенсивність зношування інструменту, як основного фактору, що визначає працездатність різців при чистовому точінні, в розглянутих роботах використовуються показники, які за своєю сутністю є енергетичними: температура різання (показник, пов'язаний з кількістю теплової енергії в зоні різання) [3], накопичена внутрішня енергія поверхневого шару інструменту [8], прихована енергія деформування зрізаного шару та прихована енергія деформування поверхневого шару обробленої деталі [5]. Теоретичні концепції та рекомендації, наведені в роботах [1–8], створюють широке поле рішень для вибору оптимальних режимів різання при чистовому точінні сталей твердосплавними різцями.

Разом з тим, в перерахованих роботах відсутній вичерпний аналіз взаємних зв'язків всіх фізичних процесів та енергетичних перетворень в зоні різання. Акцент зроблений на залежності інтенсивності зношування інструменту від безумовно важливих, але все ж таки часткових показників енергетичного стану зони різання, кожен з яких не може бути визнаний інтегральним енергетичним критерієм в силу нехтування тими чи іншими фізичними явищами, визнаними авторами концепцій як малозначимі. Вищевказане обумовлює необхідність розробки універсальної теоретичної моделі процесу різання, що враховувала б зв'язки всіх різних за природою фізичних явищ (та, відповідно, енергетичних перетворень), які впливають на інтенсивність зношування інструменту. У випадку точіння інструментом, підданим попередньому ЗЕВ, така модель повинна також враховувати вплив величини потоку енергії, що надходить до поверхневого шару інструменту при зміцненні або нанесенні покриття, спричиняючи трансформацію характеристик процесу різання та зміну інтенсивності зношування різця.

Загальні принципи розробки подібної моделі процесу різання для чистового точіння сталей твердосплавним інструментом зі зміцненням або зносостійким покриттям наведені в попередніх роботах авторів [9, 10]. В них передбачається вираження цільової функції та системи обмежень через інтегральний енергетичний критерій e процесу різання, що дорівнює співвідношенню питомої енергії відокремлення одиниці маси (об'єму) оброблюваного матеріалу (або питомої енергії утворення одиниці площі

обробленої поверхні), та питомої енергії диспергування одиниці маси (об'єму) твердого сплаву при зношуванні різальної пластини.

Огляд невирішених частин проблеми

Розгляд комплексу фізичних та енергетичних явищ при різанні в проаналізованих роботах базується на виділенні одного найважливішого явища (комплексу явищ), що визначає інтенсивність зношування інструменту, при цьому впливом інших фізичних явищ на процес різання в тій чи іншій мірі нехтують. Режими різання, вибрані на основі рекомендацій цих робіт, можна вважати оптимальними лише з чітко вказаними припущеннями.

Наприклад, в роботі О. Д. Макарова [3] в якості показника, що справляє визначальний вплив на інтенсивність зношування інструменту та характеристики процесу різання, використовується температура різання. Такий підхід зводить енергетичний баланс зони різання до теплового балансу, при цьому не враховується нетеплова складова енергії процесу різання, яка, хоч і є незначною у порівнянні з тепловою, здатна серйозно впливати на фізичні процеси в контактних мікрооб'ємах матеріалів, зокрема на процес диспергування часток поверхневого шару інструменту. В роботі Ф. Я. Якубова [8], навпаки, більшу увагу приділено процесам зміни величини внутрішньої енергії в контактній зоні та поверхневому шарі інструменту і їхньому впливу на диспергування часток інструментального матеріалу. Наголос на ролі нетеплової складової енергії процесу різання в зношуванні інструменту, в свою чергу, призводить до нівелювання ролі теплових явищ в цьому процесі. В моделі процесу різання, розробленій В. К. Старковим [5], ключовими характеристиками є значення прихованої енергії деформування зрізаного шару та прихованої енергії деформування поверхневого шару обробленої деталі, а в якості основного комплексу явищ при різанні розглядається деформація матеріалу заготовки, при цьому нівелюється роль процесів тертя.

В проаналізованих роботах не приділяється окремої уваги енергетичному стану зони різання при обробці інструментом зі зміцненням чи покриттям та зв'язку інтенсивності фізичних явищ при різанні з величиною енергії, що надходить до поверхневого шару інструменту при ЗЕВ.

Універсальна модель процесу різання не може базуватись на домінуванні комплексу явищ тільки однієї фізичної природи. Інтегральний енергетичний критерій процесу різання повинен враховувати співвідношення інтенсивності всіх енергетичних перетворень в зоні різання. При цьому загальна величина зовнішньої енергії, яка надходить до зони різання, визначатиметься величиною роботи різних сил, що витрачається на здійснення стружкоутворення, тертя та інших фізичних

процесів при різанні. В той же час величина внутрішньої енергії поверхневого шару різального інструменту, що братиме участь в контактних процесах та зазнаватиме зношування, формується за рахунок прирощення початкового значення внутрішньої енергії в результаті ЗЕВ; інтенсивність прирощення залежатиме від режимів ЗЕВ.

В зв'язку з вищевказаним, важливою задачею є аналіз системи зв'язків інтегрального енергетичного критерію процесу різання з режимами різання та попереднього ЗЕВ.

Мета статті – на основі аналізу енергетичних перетворень при чистовому точінні сталей різцями з твердосплавними різальними пластинами зі зміцненням або зносостійким покриттям сформулювати систему зв'язків інтегрального енергетичного критерію процесу різання з режимами різання та ЗЕВ.

Основна частина

При чистовому точінні стійкість інструменту і технологічні характеристики деталей визначаються інтенсивністю зношування різців. Відповідно, умовою оптимальності процесу різання має бути найменша питома інтенсивність зношування різців при відокремленні одиниці маси зрізаного шару (або утворенні одиниці площі обробленої поверхні). Тому інтегральний енергетичний критерій e визначаємо як:

$$e = \frac{e_m}{e_d} \quad (1)$$

або
$$e = \frac{e_s}{e_d}, \quad (2)$$

де e_m – питома енергія відокремлення одиниці маси оброблюваного матеріалу; e_s – питома енергія утворення одиниці площі обробленої поверхні; e_d – питома енергія диспергування одиниці маси твердого сплаву при зношуванні різальної пластини.

Основною задачею чистової токарної обробки, на відміну від чорнової та напівчистової, є не зняття якнайбільшого припуску, а утворення якнайбільшої площі нових поверхонь деталі заданої точності та якості за одиницю часу. Тому, при формулюванні виразу для інтегрального енергетичного критерію в кінцевому вигляді краще використовувати формулу (2). Але оскільки в системі зв'язків фізичних процесів в зоні різання визначальним процесом є зняття матеріалу заготовки з перетворенням його на стружку внаслідок пластичної деформації, і саме на здійснення цієї деформації витрачається найбільша складова механічної роботи сил в зоні різання [5], то в проміжних розрахунках при формуванні

теоретичної моделі процесу різання може використовуватись формула (1). Однакова прийнятність формул (1) та (2) повинна базуватись на логічному зв'язку між процесами відокремлення матеріалу зрізаного шару та утворення внаслідок цього нової поверхні, що може бути виражений принциповою залежністю типу:

$$e_s = k \cdot e_m, \quad (3)$$

де k – коефіцієнт, що встановлює співвідношення між площею утвореної поверхні та масою знятого зрізаного шару;

Величини e_m , e_s та e_d можна визначити як:

$$e_m = \frac{E_{зр}}{m}; \quad (4)$$

$$e_s = \frac{E_{утв.нов}}{S}; \quad (5)$$

$$e_d = \frac{E_{зн}}{m_d}, \quad (6)$$

де $E_{зр}$ – сумарна енергія, що витрачається на різання шару матеріалу заготовки при різанні; $E_{утв.нов}$ – сумарна енергія, що витрачається на утворення нових поверхонь при різанні; $E_{зн}$ – енергія, що витрачається на диспергування часток інструментального матеріалу при зношуванні різців; m – маса зрізаного шару, видаленого в процесі різання; S – площа нових поверхонь, утворених в результаті різання; m_d – сумарна маса часток інструментального матеріалу, диспергованих при зношуванні інструменту.

Критерій e в виразах (1) та (2) трактуємо як співвідношення «корисної» та «шкідливої» складових енергії процесу різання. «Корисна» складова енергії витрачається на утворення нової поверхні (зняття зрізаного шару), «шкідлива» – на зношування інструменту. Оптимальним умовам різання відповідає максимум e , тобто якнайбільша питома частка «корисної» складової в загальному енергетичному балансі зони різання. Згідно з (1–6)

$$e = \frac{e_s}{e_d} = \frac{k \cdot e_m}{e_d} = \frac{E_{утв.нов} \cdot m_d}{E_{зн} \cdot S} = k \cdot \frac{E_{зр} \cdot m_d}{E_{зн} \cdot m} \rightarrow \max. \quad (7)$$

Розглянемо енергетичний баланс в зоні різання при чистовому точінні сталей твердосплавним інструментом, підданим ЗЕВ. Згідно з роботою [8], закон збереження енергії в процесі різання виражається в перетворенні роботи $A_{різ}$ різання на теплову енергію Q та внутрішню енергію деформації ΔU , яка, в свою чергу, складається з набутої в результаті різання внутрішньої енергії деформованих об'ємів стружки $\Delta U_{стр}$, робочих поверхонь інструменту $\Delta U_{інстр}$ та поверхневих шарів деталі $\Delta U_{дет}$:

$$A_{різ} = Q \pm \Delta U = Q \pm (\Delta U_{стр} + \Delta U_{інстр} + \Delta U_{дет}). \quad (8)$$

Представимо $A_{різ}$ як суму роботи $A_{деф}$ деформації зсуву при стружкоутворенні, роботи $A_{m.n}$ сили тертя по передній поверхні та роботи $A_{m.з}$ сили тертя по задній поверхні. Оскільки початковий енергетичний стан зони різання залежатиме, окрім іншого, і від внутрішньої енергії контактних шарів інструменту та заготовки, пропонуємо доповнити ліву частину рівняння (8) наявними на початок різання значеннями внутрішньої енергії поверхневого шару інструменту $U_{інстр}$ та заготовки $U_{заг} = const$. Для інструменту, підданого ЗЕВ, $U_{інстр}$ дорівнює сумі початкової внутрішньої енергії $U_{інстрn}$ поверхневого шару інструменту до ЗЕВ (прийmemo, що $U_{інстрn} = const$) та прирощення внутрішньої енергії $\Delta U_{інстрЗЕВ}$ за рахунок зовнішнього потоку енергії при зміцненні або нанесенні покриття. Теплову енергію Q представимо як суму теплових енергій деформації ($Q_{деф}$), тертя по передній поверхні ($Q_{m.n}$), тертя по задній поверхні ($Q_{m.з}$) та диспергування ($Q_{дисп}$). Енергія $Q_{деф}$ розподіляється між тепловими потоками, що надходять відповідно до стружки ($Q_{дефстр}$) та до обробленої деталі ($Q_{дефдет}$), $Q_{m.n}$ – між потоками, що надходять до стружки ($Q_{m.nстр}$) та до інструменту ($Q_{m.nінстр}$), а $Q_{m.з}$ – між потоками, що надходять до обробленої деталі ($Q_{m.здет}$) та до інструменту ($Q_{m.зінстр}$). Значення $\Delta U_{інстр}$ та $\Delta U_{дет}$ трактуємо як прирощення величин $U_{інстр}$ та $U_{заг}$ при різанні.

З урахуванням вищеперерахованого, рівняння (8) має вигляд:

$$A_{деф} + A_{m.з} + A_{m.n} + U_{інстрn} + \Delta U_{інстрЗЕВ} + U_{заг} =$$

$$\begin{aligned}
&= Q_{\text{деф}_{\text{стр}}} + Q_{\text{деф}_{\text{дет}}} + Q_{m.n_{\text{стр}}} + Q_{m.n_{\text{інстр}}} + \\
&+ Q_{m.z_{\text{дет}}} + Q_{m.z_{\text{інстр}}} + Q_{\text{дисп}} \pm (\Delta U_{\text{стр}} + \Delta U_{\text{інстр}} + \Delta U_{\text{дет}}).
\end{aligned} \tag{9}$$

Наведений вигляд рівняння враховує всі енергетичні чинники процесу різання різної фізичної природи. Для всебічного аналізу системи зв'язків інтегрального енергетичного критерію e з режимами різання та ЗЕВ потрібно вирішити дві задачі:

1) аналіз зв'язків складових енергії, утвореної при різанні, з величинами $E_{\text{зр}}$, $E_{\text{утв.нов}}$, $E_{\text{зн}}$, і відтак, – з величиною e .

2) аналіз зв'язків вхідних параметрів (режимів різання та ЗЕВ) зі складовими енергії, що надходить до зони різання.

Першу задачу пропонується в загальному плані вирішувати виділенням в кожній зі складових правої частини рівняння (9) «корисної» та «шкідливої» частин, що можна відобразити як:

$$\begin{aligned}
&Q_{\text{деф}_{\text{стр}}} + Q_{\text{деф}_{\text{дет}}} + Q_{m.n_{\text{стр}}} + Q_{m.n_{\text{інстр}}} + \\
&+ Q_{m.z_{\text{дет}}} + Q_{m.z_{\text{інстр}}} + Q_{\text{дисп}} \pm (\Delta U_{\text{стр}} + \Delta U_{\text{інстр}} + \Delta U_{\text{дет}}) = \\
&= \sum_{i=1}^n Q_{\text{корі}} + \sum_{i=1}^n Q_{\text{шк}_i} + \sum_{j=1}^m \Delta U_{\text{кор}_j} + \sum_{j=1}^m \Delta U_{\text{шк}_j},
\end{aligned} \tag{10}$$

де $Q_{\text{корі}}$, $\Delta U_{\text{кор}_j}$ – «корисні» частини складових теплової енергії та прирощення внутрішньої енергії; $Q_{\text{шк}_i}$, $\Delta U_{\text{шк}_j}$ – «шкідливі» частини складових теплової енергії та прирощення внутрішньої енергії; n , m – кількість відповідно «корисних» та «шкідливих» частин складових енергетичного балансу.

«Корисною» частиною енергетичного балансу вважатимемо постійний для заданої пари «твердий слав – оброблювана сталь» мінімум теплової енергії чи будь-якого прирощення внутрішньої енергії, необхідний та достатній для утворення обробленої поверхні при знятті шару матеріалу з заданим перетином зрізу. Надлишок складової енергії, що перевищує цей мінімум, вважатимемо «шкідливою» частиною, яка витрачається на інтенсифікацію контактних процесів, і, відповідно, – на зношування інструменту. При виділенні «корисних» та «шкідливих» частин складових енергетичного балансу потрібно дотримуватись наступних правил:

- теплові потоки $Q_{m.n_{instr}}$ та $Q_{m.z_{instr}}$ належать до «шкідливих» частин, оскільки знижують механічні властивості твердого сплаву та інтенсифікують зношування інструменту;
- кожен з теплових потоків $Q_{def_{cnp}}$, $Q_{def_{det}}$, $Q_{m.n_{cnp}}$, $Q_{m.z_{det}}$ розподіляється на «корисну» та «шкідливу» частини за принципом: $Q_{кор} = Q_{кр}$; $Q_{шк} = Q - Q_{кр}$, де Q – теплова енергія потоку, що розглядається; $Q_{кр}$ – критичний рівень теплової енергії даного потоку, досягнення якого спричиняє початок дифузійного зношування контактної майданчику інструменту;
- прирощення ΔU_{instr} внутрішньої енергії при різанні розподіляється на «корисну» та «шкідливу» частини за принципом: $\Delta U_{instr_{кор}} = \Delta U_{instr_{кр}}$; $\Delta U_{instr_{шк}} = \Delta U_{instr} - \Delta U_{instr_{кр}}$, де $\Delta U_{instr_{кр}}$ – критичний рівень прирощення ΔU_{instr} , досягнення якого викликає початок знеміцнення поверхневого шару інструменту;
- прирощення внутрішніх енергій ΔU_{cnp} та ΔU_{det} розподіляються на «корисну» та «шкідливу» частину за принципом: $\Delta U_{шк} = \Delta U_{кр}$, $\Delta U_{кор} = \Delta U - \Delta U_{кр}$, де $\Delta U_{кр}$ – критичний рівень прирощення внутрішньої енергії стружки або поверхневого шару деталі, після досягнення якого починається їхнє знеміцнення (це визначення приймається для випадків, коли окремо не оговорюються вимоги до зміцнення поверхневого шару деталі).

З урахуванням вищевикладеного приймаємо, що:

$$E_{зр} = E_{утв.нов} = \sum_{i=1}^n Q_{корі} + \sum_{j=1}^m \Delta U_{корj}, \quad (11)$$

$$E_{зн} = \sum_{i=1}^n Q_{шкi} + \sum_{j=1}^m \Delta U_{шкj}. \quad (12)$$

Друга задача вирішується встановленням залежності складових лівої частини рівняння (9) від режимів різання та ЗЕВ. Для цього вводимо поняття енергетичних функцій (ЕФ) режимів різання та ЗЕВ:

- *ЕФ режимів різання* – сумарна кількість енергії, що надходить до зони різання в результаті роботи $A_{різ} = A_{def} + A_{m.z} + A_{m.n}$, і залежить від режимів різання (згідно з моделлю роботи [10] – оптимізовуваних

параметрів 1-ої групи $x_i^{(1)}$, а також прийнятої як константа глибини різання t): $e_{p.pіз} = A_{деф} + A_{m.з} + A_{m.n} = f(x_1^{(1)}, \dots, x_i^{(1)}, \dots, x_n^{(1)}) = f(v, S, t)$;

– *ЕФ режимів ЗЕВ* – енергія, що надходить до об'єму твердого сплаву при дії ЗЕВ: $e_{p.ЗЕВ} = \Delta U_{інстрЗЕВ} = k_{емр} \cdot E_{ЗЕВ} = f(x_1^{(2)}, \dots, x_i^{(2)}, \dots, x_n^{(2)})$, де $E_{ЗЕВ}$ – енергія ЗЕВ, $k_{емр}$ – коефіцієнт, який враховує втрати енергії ЗЕВ, що не надійшла до поверхневого шару твердого сплаву під час його зміцнення або нанесення зносостійкого покриття, $x_i^{(2)}$ – режими ЗЕВ (згідно з моделлю роботи [10] – оптимізовані параметри 2-ої групи $x_i^{(2)}$).

Можливий перехресний вплив режимів різання та ЗЕВ на $A_{pіз}$ в разі потреби може бути врахований за допомогою спеціальної функції $F(v, S, t, x_1^{(2)}, \dots, x_i^{(2)}, \dots, x_n^{(2)})$, логіка введення якої базується на зміні $A_{pіз}$ в результаті зміни фізико-механічних властивостей поверхневого шару твердого сплаву після ЗЕВ.

З урахуванням вищевикладеного приймаємо, що:

$$\begin{aligned} & A_{деф} + A_{m.з} + A_{m.n} + U_{інстрп} + \Delta U_{інстрЗЕВ} + U_{заг} = \\ & = e_{p.pіз} + e_{p.ЗЕВ} + F(v, S, t, x_1^{(2)}, \dots, x_i^{(2)}, \dots, x_n^{(2)}) + U_{інстрп} + U_{заг}. \end{aligned} \quad (13)$$

Згідно з (1–13), в загальному плані інтегральний енергетичний критерій e процесу різання буде виражатись як:

$$\begin{aligned} e &= k \cdot \frac{m_d}{m} \cdot \frac{E_{зп}}{E_{зн}} = k \cdot \frac{m_d}{m} \cdot \frac{(E - E_{зн})}{E_{зн}} = k \cdot \frac{m_d}{m} \times \\ & \times \frac{\left(e_{p.pіз} + e_{p.ЗЕВ} + F(v, S, t, x_1^{(2)}, \dots, x_i^{(2)}, \dots, x_n^{(2)}) + U_{інстрп} + U_{заг} - \sum_{i=1}^n Q_{шкi} - \sum_{j=1}^m \Delta U_{шкj} \right)}{\sum_{i=1}^n Q_{шкi} + \sum_{j=1}^m \Delta U_{шкj}}. \end{aligned}$$

Отриманий вираз може бути в подальшому використаний для розробки функціональних залежностей інтегрального енергетичного критерію процесу різання від ЕФ режимів різання та ЗЕВ типу $e = f(e_{p.pіз}, e_{p.ЗЕВ})$ і, відповідно, залежностей e від режимів різання та ЗЕВ.

Висновки

В статті на основі аналізу енергетичних перетворень при чистовому точінні сталей різцями з твердосплавними різальними пластинами зі зміцненням або зносостійким покриттям була сформульована система зв'язків інтегрального енергетичного критерію процесу різання з режимами різання та зміцнюючого енергетичного впливу (ЗЕВ). Ця система базується на принципах:

– представлення величини e як співвідношення питомих енергій утворення одиниці площі поверхні деталі та диспергування одиниці маси твердого сплаву при зношуванні різальної пластини;

– врахування в енергетичному балансі різання внутрішньої енергії контактних шарів інструменту і заготовки та прирощення внутрішньої енергії інструменту, деталі, стружки при різанні;

– представлення роботи різання як енергетичної функції режимів різання, а внутрішньої енергії поверхневого шару інструменту, підданого ЗЕВ, – як енергетичної функції ЗЕВ;

– вираження енергії, що витрачається на утворення нових поверхонь при різанні, та енергії, що витрачається на диспергування часток твердого сплаву при зношуванні різців, через спеціально виділені «корисні» та «шкідливі» частини в тепловій та нетепловій складових енергії, утвореної при різанні.

Перелік літератури: 1. *Кабалдин, Ю. Г.* Структурно-энергетический поход к процессу изнашивания режущего инструмента / *Ю. Г. Кабалдин* // Вестник машиностроения, 1990. – № 12. – С. 62–68. 2. *Кушнер, В. С.* Термомеханическая теория процесса непрерывного резания пластичных материалов / *В. С. Кушнер*. – Иркутск : Изд-во Иркут. ун-та, 1982. – 196 с. 3. *Макаров, А. Д.* Оптимизация процессов резания / *А. Д. Макаров*. – М. : Машиностроение, 1976. – 278 с. 4. *Силин, С. С.* Метод подобия при резании материалов / *С. С. Силин*. – М. : Машиностроение, 1979. – 152 с. 5. *Старков, В. К.* Дислокационные представления о резании металлов / *В. К. Старков*. – М. : Машиностроение, 1979. – 158 с. 6. *Тахман, С. И.* Развитие теории изнашивания твердосплавных инструментов на основе термомеханики поведения их поверхностей при резании пластичных материалов. Автореферат дис... докт. техн. наук: 05.03.01. – ГОУ ВПО «Российский университет дружбы народов». – Москва, 2009. – 36 с. 7. *Шустер, Л. Ш.* Адгезионное взаимодействие режущего инструмента с обрабатываемым материалом / *Л. Ш. Шустер*. – М. : Машиностроение, 1988. – 96 с. 8. *Якубов, Ф. Я.* Энергетические соотношения процесса механической обработки материалов / *Ф. Я. Якубов*. – Ташкент : «Фан», 1985. – 104 с. 9. *Мироненко, Є. В.* Методологические принципы создания моделей для выбора режимов резания при чистовом точении сталей резцами с твердосплавными пластинами, подвергнутыми упрочняющему воздействию / *Є. В. Мироненко, В. В. Калиниченко* // Резание и инструмент в технологических системах : Междунар. науч.-техн. сб. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2008. – Вып. 75. – С. 256–267. 10. *Мироненко, Є. В.* Загальні принципи розробки моделей для вибору оптимальних режимів різання при чистовому точінні сталей на основі використання енергетичного критерію / *Є. В. Мироненко, В. В. Калініченко, В. Ф. Колесник* // Сучасні технології в машинобудуванні [Текст] : зб. наук. праць. – Вип. 2. Редкол. : А. І. Грабченко (голова) [та ін.]. Харків : НТУ «ХП», 2008. – С. 48–57.

Е. К. ПОСВЯТЕНКО, д-р техн. наук, Київ, Україна,
В.Г. ГОНЧАРОВ, канд. техн. наук, **С.С. ДЯЧЕНКО**, д-р техн. наук,
М. А. ТКАЧУК, д-р техн. наук, Харків, Україна

ПІДВИЩЕННЯ РЕСУРСУ ТЕПЛОВОЗІВ НА БАЗІ ТЕХНОЛОГІЇ ДИСКРЕТНОГО ЗМІЦНЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ФОРСОВАНИХ ДИЗЕЛІВ

Представлено результати дослідження процесу дискретного зміцнення чавунних і сталевих деталей типу колінчатий вал двигунів важких машин. Показано вплив нової технології через комплекс фізико-механічних і експлуатаційних характеристик на підвищення ресурсу двигуна й машини в цілому.

Представлены результаты исследования процесса дискретного упрочнения чугуновых и стальных деталей типа коленчатый вал двигателей тяжелых машин. Показано влияние новой технологии через комплекс физико-механических и эксплуатационных характеристик на повышение ресурса двигателя и машины в целом.

Results of research of process of discrete hardening of pig-iron and steel details of type a cranked shaft of engines of heavy cars are presented. Influence of new technology through a complex of physicomachanical and operational characteristics on increase of a resource of the engine and the car as a whole is shown.

Актуальність і стан проблеми, мета і передумови дослідження. У 2009 році розроблена «Комплексна програма оновлення залізничного рухомого складу України на 2008 – 2020 роки», яка передбачає задоволення потреб у перевезеннях за рахунок закупівлі тепловозів нового покоління, а також за рахунок наявного тягового рухомого складу шляхом подовження терміну його експлуатації при виконанні капітального ремонту з модернізацією та ремоторизацією (тобто заміною дизелів на нові).

Програмою передбачено підвищення ресурсу тепловозів до 45 років. Масштабність такого завдання для залізничного транспорту, зокрема, і для економіки України в цілому, можна оцінити, осмисливши наступні цифри. На сьогодні лише в ДП "Укрзалізниця" експлуатуються понад 2500 тепловозів, з яких 895 – магістральні вантажні, 67 – магістральні пасажирські, решта – маневрові. Велика кількість тепловозів (технологічних, кар'єрних тощо) працюють також і на підприємствах інших відомств. При цьому фактичний середній строк служби такої потужної машини недопустимо малий – всього 16 років. Для вирішення

проблеми теоретично існує два напрямки: екстенсивний та інтенсивний. У першому випадку потрібно було б замінити усі зношені тепловози на нові, а у другому – у кілька разів підвищити ремонтпридатність тих тепловозів, що вже експлуатуються. Розрахунки вчених провідних вітчизняних технічних та профільних транспортних університетів показали, що, не відкидаючи перший напрямок, тобто оновлення парку локомотивів, особливу увагу на найближче майбутнє слід зосередити на ремонті тепловозів. Це доцільно ще й тому, що в Україні на Харківщині для цього створена потужна база – Ізюмський тепловозоремонтний завод, який в останні роки функціонує стабільно і ефективно. Капітальний ремонт одного тепловоза на підприємстві вкладається у порівняно невелику суму – 4–4,5 млн. грн. Тут доцільно зазначити, що вартість лише одного нового колінчастого вала тепловозного дизеля складає 1 млн. грн.

При ремонті будь-якої машини слід визначити її агрегат, вузол чи деталь, які у першу чергу схильні до відмов у роботі. Практика показала, що такою слабкою ланкою у тепловоза є дизель, а найбільш характерною деталлю останнього з позицій відмов є колінчастий вал. Найбільш потужний тепловоз, що масово експлуатується в Україні у теперішній час, оснащено 16-ти циліндровим дизелем 5Д49. Колінчастий вал дизеля виготовляють із сталі, яку легують хромом, молібденом та ванадієм, а для надання валу високої зносостійкості його азотують за класичною технологією у спеціальному аміачному середовищі при температурі понад 500 °С. Основним недоліком цього, в цілому одного з найефективніших методів хіміко-термічної обробки, є тривалість процесу. Так, для того щоб зміцнити поверхневий шар корінних та шатунних шийок колінчастого валу двигуна 5Д49 потрібно витратити 70–100 годин. Настільки тривале перебування вала у високотемпературному газовому середовищі призводить до його короблення. Якщо зважити на те, що маса вала сягає 1225 кг при довжині близько 4000 мм, то зрозумілою стає проблема заключних операцій шліфування, при виконанні яких доводиться видаляти значну частину зносостійкого азотованого шару. Це призводить до того, що нові колінчасті вали, як правило, мають різну товщину зміцненого шару по периметру корінних та шатунних шийок. В результаті там, де цей шар найтонший, виникають втомні віспоподібні вириви металу глибиною до 0,5 мм (рис. 1), що вимагає перешліфування вала в наступний менший ремонтний розмір. В результаті цього, згідно з діючими ремонтними технологіями, видаляється первинний азотований шар металу. Однак, оскільки повторне азотування завод-виготовлювач дизелів забороняє,

ремонтники, як варіант, застосовують досить грубу технологію гартування поверхневого шару струмами високої частоти з наступним шліфуванням. В результаті цього втрачається до 1 мм робочого шару металу. Тому після одного – трьох, максимум чотирьох ремонтів, колінчастий вал масою понад 1000 – 1500 кг доводиться утилізувати, хоча цей вал втратив усього кількесот грамів металу.

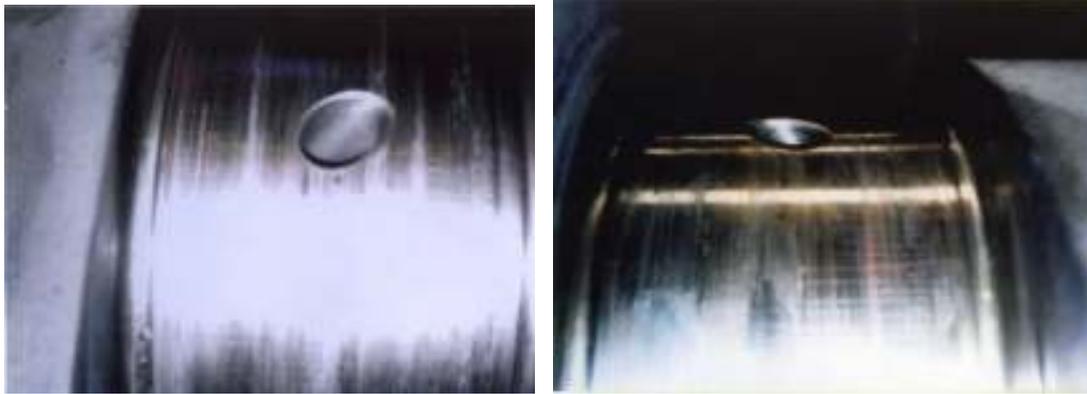


Рисунок 1 – Втомнісні тріщини на шийці колінчастого валу двигуна 5Д49

Крім тепловозів, подібні проблеми виникають при ремонті інших важких машин – прокатних станів, турбін, електричних машин, потужних металорізальних верстатів, морських та річкових суден тощо. Тому нами протягом останніх двох десятиліть був проведений цикл теоретичних та експериментальних досліджень, метою яких було визначення оптимальних напрямків підвищення надійності таких машин технологічними методами при ремонті.

Результати дослідження. Першим етапом досліджень була систематизація методів інженерії поверхні деталей машин, що знайшла відображення в наукових працях [1–3]. Було показано, що увесь спектр методів інженерії поверхні впливає на експлуатаційні властивості деталей (зносостійкість, втомнісну міцність, опір адгезійним явищам, задиростійкість, триботехнічні характеристики тощо) через комплекс фізико-механічних характеристик (мікротвердість, залишкові напруження, мікроструктуру, текстуру, мікро- і макропрофіль поверхні, товщину зміцненого шару та міцність його утримання на основі). Методи інженерії поверхні були класифіковані на 4 групи: нанесення покриттів, модифікування поверхневого шару, технологічні і комбіновані методи, а також вивчені їх можливості щодо використання для реалізації завдань даної роботи. Зокрема, були досліджені методи наплавлення, напилення, іонного імпульсного азотування, дифузійного борування, поверхневого гартування, плазмових технологій, холодного пластичного деформування та різання, модифікування за

допомогою УЗК, нанесення мікро- і макрорельєфів, нанесення покриттів змінної товщини, гібридних технологій, а також дискретних покриттів [2, 4–22]. Об'єктами досліджень служили колінчасті вали ДВЗ, поршні, зубчасті колеса, поршневі пальці, гільзи, шпинделі верстатів, валки прокатних станів, ротори електричних машин, вали турбін.

На основі цих досліджень було науково обґрунтовано принципово нову високоефективну технологію зміцнення деталей типу вал двигунів та силових агрегатів, основою якої є нова концепція формування зносостійкого шару металу. Цей шар мав би поєднувати переваги класичних суцільних покриттів, такі як добрі захисні властивості від дії середовища та високий опір зношуванню, з перевагами модифікованих холодним пластичним деформуванням та хіміко-термічною обробкою шарів, що добре утримуються на деталі, оскільки фактично є поліпшеним матеріалом останньої. Крім того, особливостями такого комбінованого методу отримання поверхневого шару є його дискретність, що передбачає чергування зносостійких "острівців" або "стрічок" будь-якої конфігурації з незміцненими ділянками основи деталі. Оскільки ці "острівці" або "стрічки" між собою розділені основним матеріалом, то кожен з них несе тільки свою частину навантаження. Цей захід дозволяє виключити розтріскування поверхневого шару під навантаженням, що є досить характерним для суцільних покриттів. Ще однією особливістю концепції є створення заглиблень на самих "острівцях" та "стрічках" зносостійкого матеріалу для поліпшення умов змащування пари деталей, що працюють при терті ковзання. Що стосується змащування, то суттєвою перевагою дискретного покриття над суцільним є різні швидкості зношування матеріалу "острівців" і матеріалу основи. Тобто під час припрацювання пари деталей в контакті утворюються мікрозазори по усій поверхні основного матеріалу, які стають резервуарами для мастила. Ця концепція лягла в основу принципово нового технічного і технологічного рішення, згідно з яким зносостійка поверхня утворюється так [19, 22, 23].

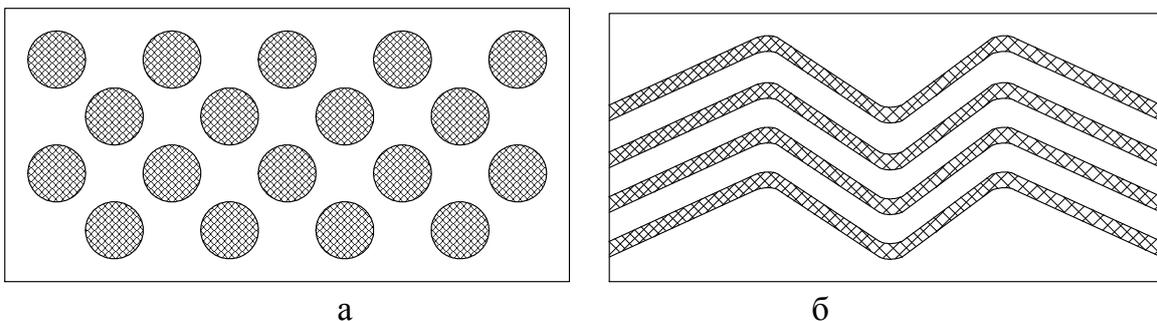


Рисунок 2 – Різновиди дискретних покриттів: а – острівцеві; б – стрічкові.

На зовнішню поверхню виробу одним з відомих методів, наприклад, електроіскровим, наноситься дискретне покриття з легуючих матеріалів у вигляді острівців або стрічок, які розміщені на певній відстані між собою (рис. 2).

Дискретне покриття має дві частини – верхній нарощений шар, що розташовується над поверхнею деталі і дифузійний шар, який вращений в деталь (рис. 3, 4).

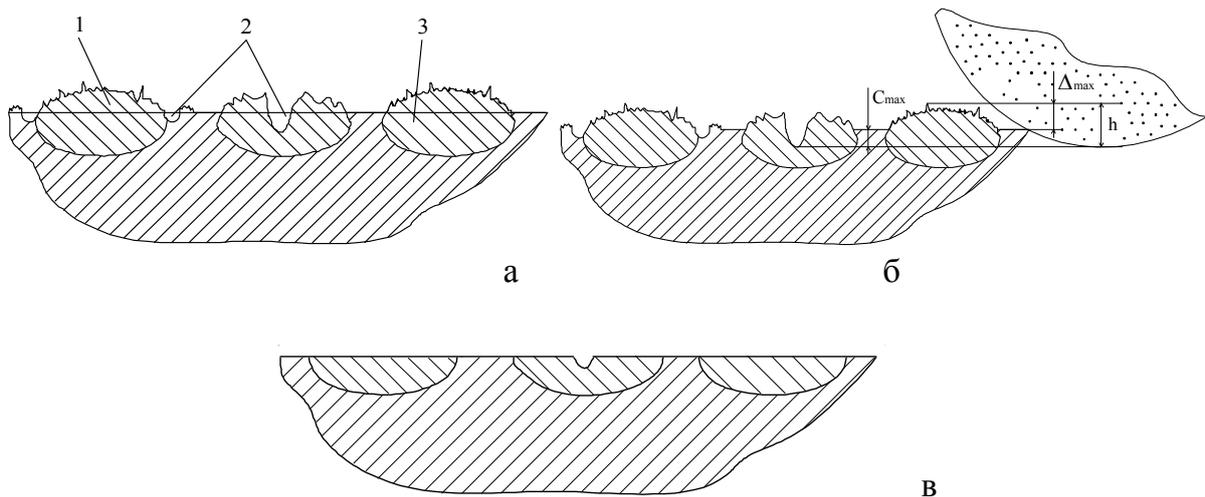


Рисунок 3 – Послідовність формування дискретної поверхні : а) профіль дискретного покриття: 1 – верхній нарощений шар; 2 – каверна; 3 – легований вращений шар; б) обробка шліфуванням; в) готова зносостійка поверхня



Рисунок 4 – Вигляд поверхні після дискретного зміцнення (до шліфування)

За рахунок високої температури та енергії розряду легуючий матеріал з електроду переноситься на катод з різким охолодженням цього матеріалу, завдяки чому на острівцях та стрічках виникають каверни. Крім того, поверхня нарощеної зони має розвинутий профіль з гострими виступами та впадинами, які є концентраторами напружень.

Після завершення нанесення дискретного покриття, визначають його максимальний приріст Δ_{max} над поверхнею, а також максимальну глибину каверн C_{max} .

Потім шліфують виріб на величину припуску

$$\Delta_{max} \leq h < C_{max},$$

де h – величина припуску під шліфування, мм; Δ_{max} – максимальний приріст дискретного покриття над поверхнею виробу, мм; C_{max} – максимальна глибина каверн, мм.

При шліфуванні зрізується нарощена частина дискретного покриття з макро- і мікродефектами, а його поверхня нівелюється відносно поверхні виробу.

У випадку зрізання зовнішнього шару виробу на величину, яка менша глибини каверн, на поверхні залишаються порожнини, що служать ємкостями для мастила.

Таким чином, запропонований спосіб електроіскрового легування є оптимальним для дискретного зміцнення шийок колінчастих валів, оскільки забезпечує можливість керування величиною дискретності, а також високу продуктивність і стабільність процесу.

У ході досліджень визначався характер напружено-деформованого стану в області окремої дискретної зони зміцнення (локально) та у глобальному масштабі (у всій конструкції). Аналіз та узагальнення одержаних результатів дало змогу встановити два типи ефектів впливу на напружено-деформований стан, що виникають при здійсненні дискретно-континуального зміцнення: « Δ -ефект» та « σ -ефект».

Перший полягає в тому, що високолегована область дискретного зміцнення при дії нормального тиску у деформованому стані дещо виступає над недеформованою областю (на величину Δ). Числовою характеристикою при цьому є відношення Δ до діючого тиску p , розрахункова величина якого може сягати 0,1 мкм/МПа і більше. Таким чином, ця підійнята частина поверхні перебирає на себе більшу частину контактного тиску у спряженні з іншою деталлю. Завдяки вищій якості поверхні дискретної зони зменшується сила тертя при відносному русі контактуючих деталей. Крім того, матеріал матриці зношується в першу чергу, чим створюються поверхневі лабіринти для змащування. Найбільший « Δ -ефект» досягається при відносній площі зміцнення 60-80 %.

Другий – « σ -ефект» - проявляється у характерному розподілі напружень в зоні дискретного зміцнення: розтягувальні напруження більші у цій зоні навіть при рівномірному прикладанні тиску на поверхню, в

результаті чого і еквівалентні напруження вищі на 10–15 % порівняно із зоною основного матеріалу зміцнюваного елемента машини. Оскільки внаслідок термохімічних процесів відбувається перемішування електродного і основного матеріалів та розчинення вуглецю в аустеніті, механічні властивості зони зміцнення значно (до 50 %) вищі, ніж основного, завдяки чому відбувається зростання запасу міцності для отриманої системи матеріалів в цілому.

Найбільш значний « σ -ефект» досягається при відносній площі зміцнення 65–75 %. Співставлення інтервалів найбільшого позитивного прояву « Δ -ефекту» та « σ -ефекту» дає змогу визначити рекомендований інтервал дискретності покриття в області 60–75% (рис.5).

На підставі сказаного можна стверджувати, що інтегральний вплив запропонованої технології на напружено-деформований стан зміцнюваних тіл у поверхневому шарі дуже сприятливий як для його загальної міцності, так і для стійкості проти зношування.

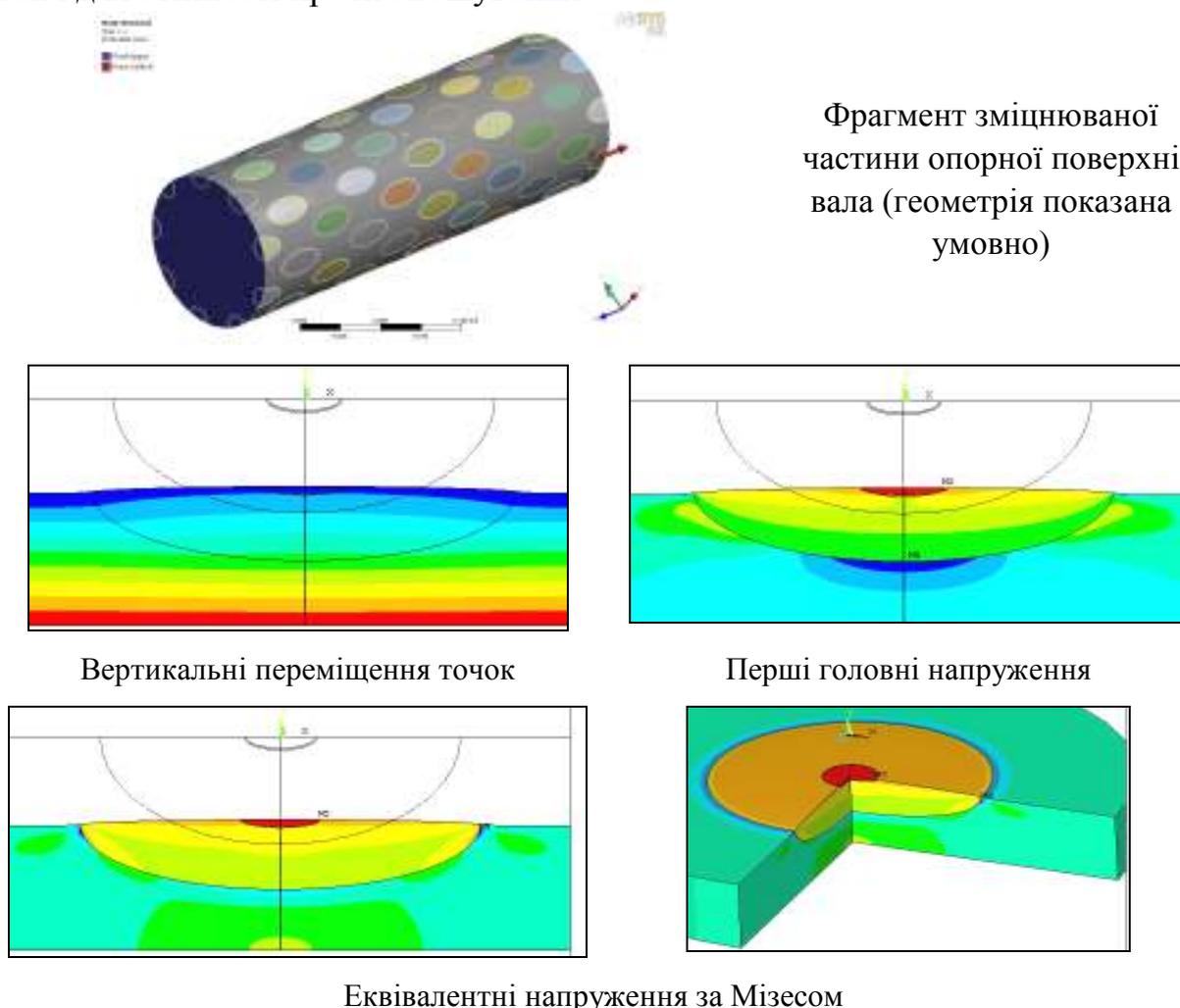


Рисунок 5 – Залежність « Δ -ефекту» від коефіцієнта дискретного зміцнення

Металографічний аналіз зразків після дискретного зміцнення показав, що в поверхневому шарі дослідних зразків чітко виявляється зона, яка різко відрізняється від основного матеріалу. Вона має вигляд світлої блискучої плями. Умовно цю зону названо «білим» шаром. Товщина «білого» шару дорівнює 200–400 мкм, а її мікротвердість перевищує мікротвердість основного металу і коливається в межах 500–1000 МПа. Для встановлення природи «білого» шару, що утворюється при дискретному зміцненні, досліджували його структуру та фазовий склад. Дані фазового, мікрорентгеноспектрального та спектрального аналізів і металографії дають змогу стверджувати, що «білим» шаром є суміш матеріалів електрода і зразка, які перемішалися у момент розряду (у полум'ї дуги), а потім закристалізувалися при охолодженні з великою швидкістю. Безпосередньо під «білим» шаром розташована зона змінного хімічного складу і мікротвердості (рис. 6).

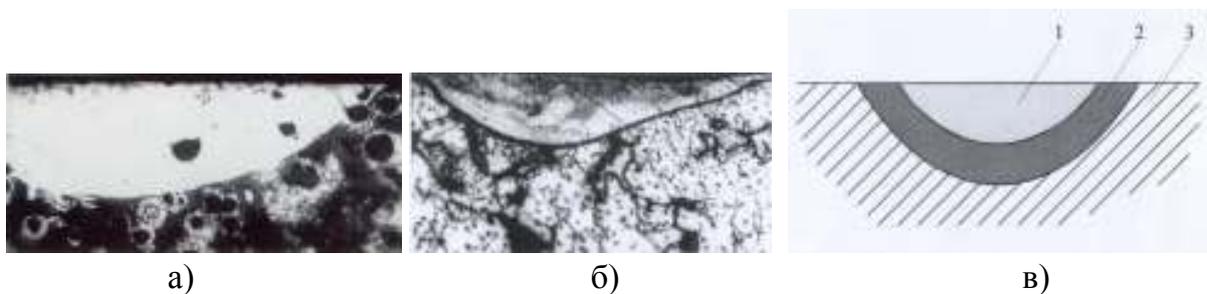


Рисунок 6 – Зміцнені зони: а – чавунні зразки; б – сталеві зразки (х 100); в – схема розташування шарів: 1 - «білий» шар; 2 – підшар; 3 - основний метал

Характер структури і розподіл елементів по перерізу зони дискретного зміцнення у високоміцному чавуні наведений на рис. 7 – 10. На рис. 7 лінією відмічений відрізок, на якому аналізувався розподіл елементів. Розподіл легувальних елементів визначали за допомогою рентгенівського мікроаналізатора MAP-3 з використанням спеціальної приставки до електронного мікроскопа РЕМ-106.

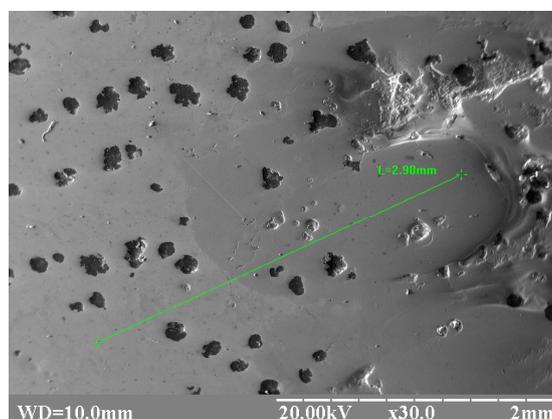


Рисунок 7 – Структура чавуну у дискретно зміцненій зоні; х30

Такі дані були отримані для усіх проаналізованих зразків, що дозволило оцінити зміни у хімічному складі різних зон при дії дискретного розряду.

На рис. 7 видно, що в «білому» шарі чавунних зразків виявляються включення графіту. Це свідчить, що ця зона є сумішшю матеріалів електрода і зразка, перемішаних у момент розряду, а потім закристалізованих при охолодженні.

Детальніше розташування окремих зон в місці дії дуги видно при збільшенні 100 (рис. 8).

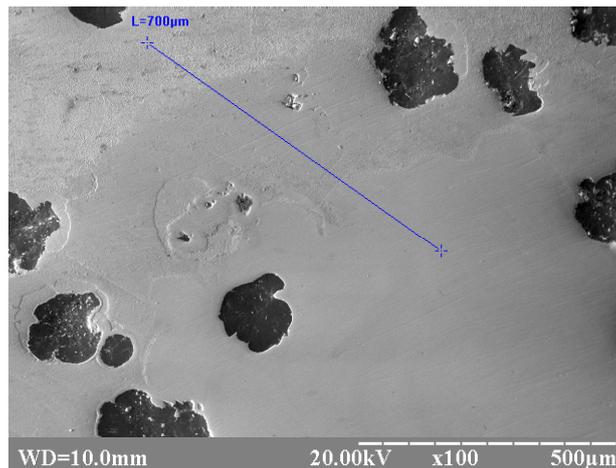


Рисунок 8 – Мікроструктура чавуну в зоні дискретного зміцнення; x100

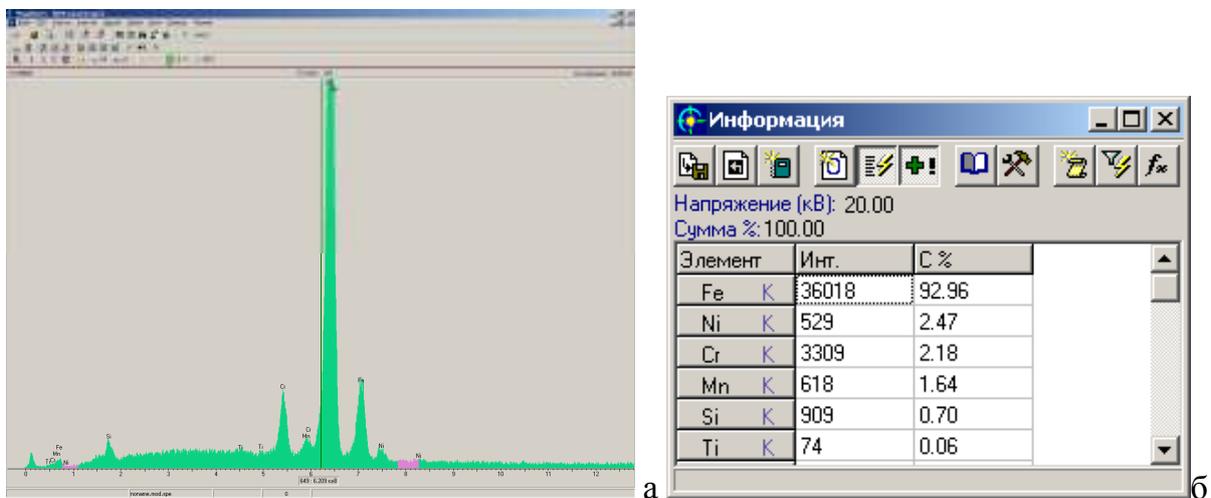


Рисунок 9 – Спектр випромінювання (а) і середній вміст елементів у полі (б)

З рисунка 8 випливає, що під впливом високої температури в момент розряду відбувається поступове розчинення графітних включень. Особливо чітко це видно у підшарі, де температури нижчі, ніж на поверхні, і навколо графітних включень виявляється зона з підвищеним вмістом вуглецю за рахунок їх часткового розчинення (на рис. 8 вони указані стрілками). Середній вміст елементів в кожній із зон після дискретного зміцнення наведений на рис. 11.



a

kV	20	OffAn	30			
Step	145 мкм	Time	100 с.			
File_Name	Si K	Ti K	Cr K	Mn K	Fe K	Ni K
1	0.67	0.14	6.65	1.81	85.88	4.85
2	0.38	0.13	11.8	1.19	78.24	8.26
3	0.37	0.19	13.36	1.32	76.08	8.68
4	0.4	0.12	12.47	1.28	77.73	7.99
5	0.31	0.08	16.97	1.18	71.4	10.06
6	0.39	0.14	14.48	1.23	74.85	8.91
7	0.4	0.2	14.96	1.6	74.1	8.74
8	0.38	0.01	14.4	1.33	74.54	9.34
9	0.72	0	0.73	2.03	95.51	1.01
10	0.46	0.08	11.02	1.25	79.88	7.3
11	0.86	0	0.09	1.41	97.65	0
12	0.76	0	0.11	1.25	97.88	0
13	0.82	0	0.02	1.36	97.8	0
14	0.76	0	0.08	1.81	97.35	0
15	0.77	0	0.02	1.21	98	0
16	0.81	0	0.05	1.29	97.84	0
17	0.77	0	0.05	1.51	97.67	0
18	0.8	0	0.08	1.52	97.6	0
19	0.88	0	0.09	1.67	97.36	0
20	0.73	0.01	0.06	1.61	97.59	0
21	0.81	0.01	0.02	1.63	97.52	0

б

Рисунок 10 – Розподіл елементів вздовж лінії на рис .7 (а)
і їх вміст у кожній точці (б)

Напряжение (кВ): 20.00
Сумма %: 100.00

Элемент	Инт.	С %
Fe K	26116	71.85
Cr K	9168	14.86
Ni K	1910	9.01
C K	58	2.88
Mn K	383	1.04
Si K	391	0.32
Ti K	34	0.03

а

Напряжение (кВ): 20.00
Сумма %: 100.00

Элемент	Инт.	С %
Fe K	27241	72.62
Cr K	9224	14.48
Ni K	1833	8.39
C K	58	2.89
Mn K	378	1.00
Si K	480	0.38
Ti K	264	0.25

б

Напряжение (кВ): 20.00
Сумма %: 100.00

Элемент	Инт.	С %
Fe K	35687	95.97
Mn K	785	2.18
C K	17	1.06
Si K	953	0.75
Cr K	135	0.04

в

Напряжение (кВ): 20.00
Сумма %: 100.00

Элемент	Инт.	С %
Fe K	34540	95.84
C K	24	1.62
Mn K	564	1.62
Si K	1041	0.85
Cr K	190	0.06

г

Рисунок 11 – Усредненный вміст елементів у різних зонах розряду: а, б – різні місця «білого» шару; в, г – різні місця підшару (в – ближче, г – далі від поверхні)

Наведені дані свідчать, що в «білому» шарі значно підвищився вміст вуглецю – з 0,12 % у матеріалі електрода (сталь 12Х18Н10Т) до 2,88-2,89 % у плямі.

Змінюється також вміст інших елементів: за рахунок перемішування з матеріалом чавуну кількість хрому, нікелю і кремнію дещо зменшується у порівнянні з матеріалом електрода, але значно збільшується по відношенню до вихідного чавуну. Відповідно зменшується вміст заліза (рис. 11, а, б). В перехідній зоні (у підшарі) кількість хрому і нікелю різко знижується (рис. 11, в, г). Це дозволяє стверджувати, що дифузія через малий час дії розряду і велику швидкість охолодження не відбувається, а хімічний склад змінюється тільки за рахунок перемішування та розчинення графіту. Розподіл елементів показаний на рис. 12.

Слід також звернути увагу на розподіл вуглецю. Найбільший його вміст (~ 2,9 %) реєструється у поверхневому шарі, оскільки тут найвища температура і активніше йде розчинення графіту у матеріалі електрода. Але на певній відстані від поверхні температура падає, розчинення графіту різко уповільнюється, і кількість вуглецю знижується до 1,06 % (рис.11, в). В міру

наближення до матеріалу основи кількість вуглецю знову підвищується (рис. 11, г). Таким чином, вміст легувальних елементів, як і слід було чекати, поступово знижується з відстанню від поверхні, а кількість вуглецю змінюється немонотонно, набуваючи мінімуму на певній відстані.

Наявність «підшару» є важливим чинником отримання необхідних властивостей у зміцнених деталях, оскільки завдяки цьому відбувається поступовий перехід від поверхневої зони до серцевини. Особливо позитивну роль грає зменшення кількості вуглецю при переході від аустенітної структури сталі до чавуну, що виключає можливе окрихчення виробів.

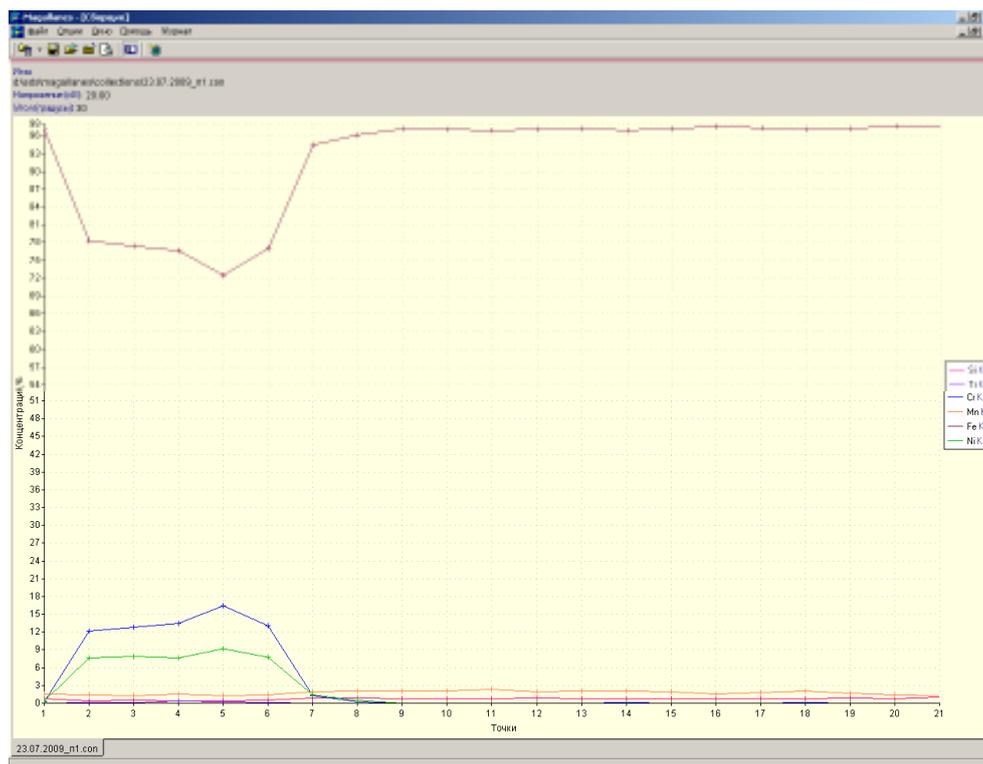


Рисунок 12 – Розподіл елементів по глибині зони дискретного розряду у чавуні

Експлуатаційними випробуваннями встановлено, що дискретне зміцнення чавуну забезпечує підвищення його зносостійкості у 8–10 разів порівняно зі стандартною технологією нормалізації і в 1,3–1,5 разів у порівнянні з гартуванням СВЧ, а сталі – у 1,6–3,5 рази у порівнянні з азотуванням. Одночасно з цим як у сталі, так і в чавуні покращується припрацьовуваність і зменшується зношувальна здатність, тобто зношування вкладиша.

На базі розробок і багаторічного досвіду по адаптації і впровадженню у виробництво дискретного зміцнення Приватною науково-дослідною виробничо-комерційною фірмою «ТАВІ» та ДП Укрзалізниця і за результатами науково-дослідних робіт, проведених Національним

технічним університетом «ХПІ», Харківським національним автомобільно-дорожнім університетом і Національним транспортним університетом, була розв'язана задача створення способу зміцнення поверхонь високонавантажених деталей, що виключає недоліки традиційних технологій зміцнення.

Спосіб формування зносостійких поверхонь металевих виробів (дискретне зміцнення) за отримуваними фізико-механічними і триботехнічними характеристиками не поступається кращим світовим аналогам: низькотемпературному ціануванню, яким зміцнюють колінчасті вали двигунів фірми «Хонда» (Японія); газовому азотуванню, що використовується для важконавантажених деталей двигунів у Росії, Великобританії та інших країнах; електродуговій металізації, що застосовується фірмою «CRP Industry» (США). Більш того, він є кращим за них, оскільки не супроводжується недоліками, притаманними кожному з названих способів.

При впровадженні технології дискретного зміцнення на ДП «Завод ім. В. О. Малишева» для визначення впливу масштабного чинника при дискретному зміцненні колінчастих валів дизелів типа Д80 (високоміцний легований чавун з кулястим графітом) проведені натурні випробування на втомну міцність на двох відсіках колінчастого вала. Аналіз результатів випробувань показав, що масштабний чинник не є суттєвим. Одночасно підтверджено, що зміцнення не призводить до зниження втомної міцності виробу. Такий же результат отриманий і для сталевих валів.

З метою розширення застосування технології дискретного зміцнення для колінчастих валів інших двигунів були проведені дослідницькі роботи по зміцненню колінчастих валів зі сталі 38ХН3МА та 42ХМЮ, які використовуються для двигунів типу 5Д49 і КамАЗ-740.

При надходженні двигуна 5Д49 на капітальний ремонт встановлено, що після шліфування шийок колінчастого вала під другий ремонтний розмір, а інколи і під перший ремонтний розмір, практично відсутній зміцнений (азотований) шар. Тому для продовження терміну експлуатації двигуна 5Д49 були розроблені технічні умови ТУ В 29.1-22615920-001:2005, що передбачають при ремонті замість повторного азотування застосовувати дискретне зміцнення шийок колінчастих валів.

Пробіг тепловозів після ремонту колінчастих валів двигунів після дискретного зміцнення корінних і шатунних шийок на даний час складає 270–780 тис. км, і всі вони знаходяться в експлуатації, хоча гарантійний пробіг після ремонту колінчастого валу складає 240 тис. км.

Дана технологія використовується в Ізюмському тепловозремонтному заводі при ремонті, модернізації та ремоторизації магістральних тепловозів серій 2ТЕ10 та 2ТЕ116 (рис. 13).



Рисунок 13 – Магістральний тепловоз 2ТЕ10М з модернізованим двигуном

Доцільність використання дискретного зміцнення була також підтверджена на ВАТ «Краматорський завод важких верстатів» при виготовленні деталей шпindelної групи (телескопічного шпінделя) верстатів моделей 9А350Ф1 і 9А340.

Дискретне зміцнення було також апробоване на Криворізькому металургійному комбінаті при обробці двох комплектів прокатних валків. Це забезпечило випуск додаткової продукції на 15 млн. грн.

Наведені приклади свідчать про те, що успішне використання дискретного зміцнення впродовж 10 років дає можливість українським виробникам підсилити свої позиції на внутрішньому і зовнішньому ринках за рахунок збільшення конкурентоспроможності виробів. Економічний ефект від впровадження дискретного зміцнення забезпечується зниженням виробничих витрат при виготовленні і ремонті деталей двигунів та силових агрегатів з високими експлуатаційними і триботехнічними характеристиками, що збільшує ресурс тепловозів та інших важких машин.

Висновки

На підставі проведених фундаментальних та прикладних досліджень уперше науково обґрунтована та експериментально підтверджена можливість підвищення ресурсу тепловозів на базі технології дискретного зміцнення деталей двигунів та силових агрегатів, виготовлених з чавуну і сталі, що забезпечує, порівняно з відомими способами зміцнення, високий рівень зносостійкості та втомної міцності з одночасним збільшенням задиростійкості та зменшенням зношувальної здатності.

Установлено, що границя між зміцненим шаром та основним металом не є технологічним концентратором напружень і не знижує втомну міцність.

Впровадження результатів проведених дослідницьких робіт в серійне виробництво дало можливість скоротити закупівлю дорогих імпорتنих запасних частин до силових агрегатів тепловозів та інших машин і зменшити капітальні витрати на створення спеціалізованих ділянок для зміцнення деталей, а, отже, значно скоротити споживання енергоресурсів.

Список літератури: 1. *Канарчук В.С.* Інженерія поверхні деталей транспортних засобів: сучасний стан і перспективи / *В.С. Канарчук, Е.К. Посвятенко, Л.А. Лопата* // Вісник Національного транспортного ун-ту. – К., 2000. – Вип.4. – С. 6–24. 2. Електроконтактне зміцнення як метод інженерії поверхні деталей транспортних засобів при їх виготовленні та відновленні / *В.С. Канарчук, Е.К. Посвятенко, Л.А. Лопата, О.П. Токін* // Вісник Національного транспортного університету. – К., 2001. – Вип.5. – С. 3–8. 3. Пути совершенствования методов инженерии поверхности деталей машин / *М.И. Черновол, В.М. Корж, Э.К. Посвятенко и др.* // Теоретические и технологические основы упрочнения и восстановления изделий машиностроения: Сб. науч. тр. – Минск, 2001. – С.279–282. 4. Електродугова металізація як спосіб ремонту та інженерії поверхні автомобільних деталей, вузлів та агрегатів / *Е.К. Посвятенко, Л.А. Лопата, Н.А. Савченко, І.К. Римаренко* // Системні методи керування, технологія та організація виробництва, ремонту і експлуатації автомобілів: Зб. наук. пр. Нац. трансп. ун-ту. – К., 2002. – Вип.15. – С.186–190. 5. Ремонт шестеренних насосів гідросистем дорожніх машин / *Е.К. Посвятенко, Н.І. Посвятенко, В.М. Кропівний, В.В. Русских* // Вестник Харьковского Национального автомобильно-дорожного университета. – Х.: ХНАДУ. – 2007. – Вип.38. – С.113–117. 6. *Посвятенко Е.К.* Відновлення колінчастих валів двигунів внутрішнього згоряння іонно-імпульсним азотуванням / *Е.К. Посвятенко, В.В. Алексєєв, А.В. Рутковський* // Вісник Сумського державного ун-ту: Серія технічні науки (машинобудування). – Суми, 2005. – № 11. – С. 119–122. 7. *Посвятенко Е.К.* Низькочастотне іонно-імпульсне азотування як метод інженерії поверхні деталей ДТЗ / *Е.К. Посвятенко, В.В. Алексєєв* // Вісник Національного транспортного університету: в 2-х ч. – К.: НТУ.– 2007. – Вип.15. – Ч.1. – С.25–33. 8. Розрахунок елементів конструкцій з врахуванням зміцнення поверхневих шарів дифузійним боруванням / *М.Ф. Дмитриченко, В.Г. Піскунов, Е.К. Посвятенко, О.М. Демчук* // Вісник Національного транспортного університету. – К., 2004. – Вип. 9. – С.8–15. 9. *Дмитриченко Н.Ф.* Тенденції поверхностного упрочнення зубчатих коліс / *Н.Ф. Дмитриченко, Б.А. Ляшенко, Э.К. Посвятенко* // Надійність і довговічність машин і споруд. – К.: ІПМіцн. ім. Г.С. Писаренка НАН України, 2005. – Вип.24. – С. 127–144. 10. *Посвятенко Е.К.* Наукове підґрунття процесів модифікування матеріалів холодним пластичним деформуванням / *Е.К. Посвятенко, Ю.М. Іванов* // Високі технології в машинобудуванні: Зб. наук. пр. НТУ „ХПІ”. – Х., 2001. – Вип. 1. – С.219–227. 11. *Посвятенко Э.К.* Протягивание как составляющая

технологических и гибридных методов инженерии поверхности деталей машин / Э.К. Посвятенко // Високі технології в машинобудуванні: Зб. наук. пр. – Х.: НТУ "ХПІ". – 2008. – Вип.2. – С.328–333. **12.** *Посвятенко Э.К.* Формирование остаточных напряжений в гильзах гидроцилиндров технологическими методами / Э.К. Посвятенко, Ю.В. Гешелин // Повышение эффективности протягивания. – Рига: Рижский политехн. ин-т, 1990. – С.75–81. **13.** *Посвятенко Е.К.* Формування регулярного макрорельєфу поверхонь отворів деталей комбінованим протягуванням // *Е.К. Посвятенко, Ю.Б. Паладійчук* // Вестник Национального технического университета Украины "КПИ": Машиностроение. – К., 1999. – Вып.37. – С. 256–261. **14.** *Посвятенко Е.К.* Формування технологічних канавок на деталях машин методом пластичного деформування з ультразвуком / *Е.К. Посвятенко, В.В. Турич, М.М. Чорнопищук* // Резание и инструмент в технологических системах. – 1998. – Вып. 52. – С.169–172. **15.** *Ляшенко Б.А.* Восстановление покрытиями переменной толщины детали при локальном износе / *Б.А. Ляшенко, Э.К. Посвятенко, В.И. Мирненко* // Автомобильный транспорт: Сб. науч. тр. Харьковского нац. авт.-дор. ун-та. – Харьков, 2003. – Вып.13. – С.119–122. **16.** *Посвятенко Э.К.* Гибридные процессы инженерии поверхности деталей машин / Э.К. Посвятенко // Инженерия поверхности и реновация изделий: Матер. 8-ой междунар. науч.-техн. конф. – К.: АТМ Украины, 2008. – С.195–198. **17.** Вплив дискретних покриттів та холодного деформування на дисипативні властивості матеріалів / *А.П. Яковлев, Е.К. Посвятенко, О.В. Мельник, А.М. Безрукавий* // Вісник Національного транспортного ун-ту: в 2-х частинах. – К., 2008. – Вип.17. – Ч.1. – С. 19–22. **18.** Износостойкость алюминиевого сплава с дискретными электроискровыми покрытиями / *Е.К. Соловых, Б.А. Ляшенко, Э.К. Посвятенко, А.Н. Безрукавый* // Проблемы тертя та зношування. – К.: НАУ, 2006. – Вип. 46. – С. 160–168. **19.** *Посвятенко Е.К.* Основні напрямки синтезу ресурсозберігаючих процесів виготовлення гідроциліндрів машин / *Е.К. Посвятенко, Р.В. Будяк* // Високі технології в машинобудуванні: Зб. наук. пр. НТУ "ХПІ". – Х., 2009. – Вип.2 (19). – С. 128–134. **20.** *Гончаров В.Г.* Исследование изменения характеристик трения по глубине дискретного слоя / *В.Г. Гончаров, А.К. Олейник, Г.Г. Гринченко* // Збірник наукових праць Запорізького національного техніч. ун-ту. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2003. – С. 100–101. **21.** Влияние режимов дискретного упрочнения на эксплуатационные свойства деталей автомобилей / *Б.В. Савченков, В.Г. Гончаров, Н.Г. Александров, А.Л. Самсоник* // Автомобильный транспорт: Сб. научн. тр. Харьк. нац. авт.-дор. ун-та. – Х., 2005. – Вып.16. – С. 83–85. **22.** *Гончаров В.Г.* Підвищення ресурсу транспортної техніки удосконаленням технології ремонту колінчастих валів: Автореф. ... канд. техн. наук: 05.22.20 / В.Г. Гончаров: Харківський національний автомобільно-дорожній ун-т. – Х., 2008. – 19 с. **23.** Спосіб формування зносостійкої поверхні металевих виробів. Патент на винахід № 79336 Україна, МПК Е 21 Д 21/00, В 23 Н 9/00/ *В.Г. Гончаров, О.П. Клімова* (Україна). – № 200505863; Заявлено 14.06.05, Опубл.17.10.05. Бюл. № 10. – 17 с.

Н. С. РАВСКАЯ д-р тех. наук,
Т. П. НИКОЛАЕНКО канд. тех. наук,
А. А. ПЛИВАК, Киев, Украина

ГЕОМЕТРИЯ СПИРАЛЬНОГО СВЕРЛА В РАЗЛИЧНЫХ СИСТЕМАХ КООРДИНАТ

В роботі розглянута геометрія різальної частини спіральних свердел в різних системах координат. Встановлений характер зміни цих кутів на різальній кромці.

В работе рассмотрена геометрия режущей части спиральных сверл в разных системах координат. Установлен характер изменения этих углов на режущей кромке.

In the article geometry of cutting part of spiral drills is considered in the different systems of co-ordinates. Character of change of these corners is determined on a cutting edge.

Вступлення

Общая теория и методика определения геометрических параметров стандартного спирального сверла разработана П.Р. Родиным в работе [1]. Показано, что с точки зрения геометрии режущей части сверл, этот инструмент является самым несовременным и характеризуется резким изменением геометрических параметров вдоль режущей кромки. Поэтому работы многих исследователей были направлены на улучшение конструкции сверл с целью обеспечения более стабильной геометрии режущей части сверла [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 и др.].

Однако, во всех работах по совершенствованию конструкции режущей части геометрия сверла рассматривалась в инструментальной системе координат, что в общем случае не в полной мере отражает значение геометрических параметров в процессе резания. В работах [12, 13, 14] рассмотрена общая теория определения геометрических параметров инструмента, в том числе и спиральных сверл, в различных системах координат.

Известно, что влияние подачи в центральной зоне сверла оказывает существенное значение на результирующую скорость резания \bar{V}_e , так как с приближением к центру сверла скорость главного движения точек его режущей кромки \bar{V} стремится к нулю. Можно предположить, что пренебрежение значением подачи может привести в некоторой точке режущей кромки к существенным отличиям между статическими и кинематическими параметрами. Поэтому возникла задача сравнительного

исследования геометрии спирального сверла на его режущей кромке в различных системах координат для обоснования выбора системы координат при анализе передних и задних углов и на этой основе разрабатывать сверла с улучшенной конструкцией режущей части.

Анализ геометрии режущей части спирального сверла в различных системах координат.

В работах [1, 14, 15] соответственно приведены зависимости, по которым можно рассчитать значения геометрических параметров сверла вдоль режущих кромок соответственно в инструментальной и статической, кинематической системах координат. Для сравнения эти зависимости приведены в табл. 1. [16]

Анализ приведенных зависимостей показывает, что изменение углов в различных системах координат зависит от значений заданных инструментальных геометрических параметров, положения плоскостей резания и рабочей плоскости, определяемых векторами \bar{V} , \bar{V}_e и \bar{S} .

Таблица 1 – Определение геометрических параметров спирального сверла на режущей кромке

Инструментальная система координат	Статическая система координат	Кинематическая система координат
α_0 – задано φ – задано	$tg\varphi_{cx} = tg\varphi \cdot \cos\mu_x$	
$tg\gamma_{hx} = tg\omega_x \frac{1 - \sin^2\mu_x \cdot \sin^2\varphi}{\sin\varphi \cdot \cos\mu_x} - tg\mu_x \cdot \cos\varphi$	$tg\gamma_{cx} = \frac{tg\omega_x}{\sin\varphi_{cx}} - tg\mu_x \cdot \cos\varphi_{cx}$	$tg\gamma_{kx} = tg\gamma_{hx} / \cos\lambda_{kx}$
$tg\gamma = \frac{tg\gamma_{hx}}{\cos\lambda_x}$	$tg\gamma_{hcx} = tg\gamma_{cx} \cdot \cos\lambda_{cx}$	$tg\gamma_{hkx} = \gamma_{hcx} + \tau_{Nx}$
$\cos\lambda_x = \sin\varphi \cdot tg\mu_x$	$tg\lambda_{cx} = tg\mu_x \cdot \sin\varphi_{cx}$	$tg\lambda_{kx} = ctg\varphi_{C_x} \cdot \sin\tau_{Nx}$
$tg\alpha_{hx} = \sin\mu_x \cdot ctg\varphi + \frac{tg\theta_N \cdot \cos\mu_x}{\sin\varphi}$	$ctg\alpha_{cx} = \frac{ctg\alpha_{PC}}{\sin\varphi_C} - tg\mu_x \cdot \cos\varphi_{cx}$	$tg\alpha_k = tg\alpha_{hkx} \cdot \cos\lambda_{kx}$
	$tg\alpha_{hcx} = tg\alpha_C / \cos\lambda_{cx}$	$\alpha_{hkx} = \alpha_{hcx} - \tau_{Nx}$

Значение углов в кинематической системе координат в исследуемой точке режущей кромки зависит от значения угла между кинематической и статической плоскостями резания τ_{Nx} в этой точке, который определяется по формуле:

$$tg\tau_{Nx} = tg\delta_x \cdot \sin\varphi_{C_x}, \quad (3)$$

где угол δ_x , определяющий положение вектора результирующего движения \bar{V}_e в исследуемой точке равен:

$$tg\delta_x = \frac{S_0}{2\pi r_x}, \quad (4)$$

где S_0 – подача на один оборот сверла; r_x – радиус рассматриваемой точки режущей кромки.

По приведенным в табл. 1 зависимостям можно определять изменения передних и задних углов вдоль режущей кромки спирального сверла в различных системах координат.

Изменение передних углов спирального сверла в различных системах координат.

При определении передних углов вдоль режущей кромки будем считать, что угол наклона винтовой канавки $\omega=30^\circ$, угол при вершине $2\varphi=120^\circ$, диаметр сердцевины $d=0,15D$, где d – диаметр сердцевины. Согласно формуле табл. 1, при определении статический передний угол γ_c

зависит от ω_x , который определяется из зависимости $tg\omega_x = tg\omega \frac{R_x}{R}$ и угла φ_c в исследуемой точке режущей кромки, определяемый углом μ_x .

Изменение углов φ , λ , γ и γ_n на режущей кромке стандартного спирального сверла в инструментальной и статической системе координат, которые приведены в табл. 2. Таким образом, как показывает анализ изменения значений передних углов, рассчитанных в инструментальной и статической системах, практически совпадают. Их разница лежит в поле допуска на геометрические параметры сверла.

Таблица 2 – Изменение углов φ , λ , γ и γ_n на режущей кромке сверла

$\frac{R_x}{R}$	ω_x	μ_x	Инструментальная система координат				Статическая система координат		
			φ	λ	γ	γ_n	φ_c	λ_c	γ_c
1	30°	$8^\circ 37'$	60°	$7^\circ 28'$	$30^\circ 25'$	$30^\circ 25'$	$59^\circ 43'$	$7^\circ 28'$	$30^\circ 38'$
0,8	$24^\circ 30'$	$10^\circ 48'$		$9^\circ 21'$	$23^\circ 40'$	$23^\circ 25'$	$59^\circ 33'$	$9^\circ 21'$	$23^\circ 43'$
0,6	$19^\circ 6'$	$14^\circ 29'$		$12^\circ 30'$	$19^\circ 40'$	$14^\circ 45'$	$59^\circ 12'$	$12^\circ 30'$	$15^\circ 10'$
0,4	13°	22°		19°	$3^\circ 30'$	$3^\circ 15'$	$58^\circ 05'$	19°	$3^\circ 20'$
0,2	$6^\circ 35'$	$48^\circ 35'$		$40^\circ 30'$	$-40^\circ 20'$	$-24^\circ 05'$	$48^\circ 53'$	$40^\circ 30'$	$-31^\circ 21'$

Такое отличие между значениями передних углов на режущей кромке объясняется незначительным отличием значений главного угла в плане в инструментальной и статической системах координат.

Значение передних углов в кинематической системе координат γ_k больше в сравнении со статическими углами γ_c на величину угла τ_{Nx} , который в свою очередь зависит как от угла между векторами скорости главного движения и подачи, так от статического главного угла в плане φ_c . Допустимая подача при сверлении согласно [17] определяется диаметром сверла. Поэтому рассмотрим, как изменяется угол τ_N при различных φ_c и

при допустимых подачах для разных диаметров сверла. Так как скорость точек режущей кромки уменьшается от периферии к центру, то угол между статической и кинематической плоскостями будет расти, изменяясь от минимального значения до максимума в центральной зоне сверла.

Изменение угла τ_N на режущей кромке для сверл разных диаметров и соответственно при допустимой для этих диаметров подачи при различных значениях φ приведены в табл. 3.

Анализ полученных значений τ_N показывает, что с увеличением угла φ и отношения подачи к диаметру сверла, угол τ_N увеличивается. Однако, для спиральных сверл с отношением диаметра сердцевины к диаметру сверла равным 0,15 и углом наклона стружечной канавки $\omega=30^\circ$ для φ в диапазоне $45^\circ \div 90^\circ$ это увеличение не выходит за пределы допуска сверла. Поэтому анализ геометрии передней поверхности спиральных сверл и разработка новых конструкций режущей части можно приводить в инструментальной системе координат. Это объясняется несущественным изменением передних углов, измеренных в различных системах координат.

Таблица 3 – Изменение угла τ_N на режущей кромке спирального сверла

$\frac{R_x}{R}$	$\varphi=45^\circ$			$\varphi=60^\circ$			$\varphi=90^\circ$		
	$\varnothing 3$ мм S=0,05 мм/об	$\varnothing 5$ мм S=0,12 мм/об	$\varnothing 18$ мм S=0,32 мм/об	$\varnothing 3$ мм S=0,05 мм/об	$\varnothing 5$ мм S=0,12 мм/об	$\varnothing 18$ мм S=0,32 мм/об	$\varnothing 3$ мм. S=0,05 мм/об	$\varnothing 5$ мм. S=0,12 мм/об	$\varnothing 18$ мм S=0,32 мм/об
1	0°13'	0°18'	0°17'	0°16'	0°23'	0°17'	0°18'	0°26'	0°19'
0,8	0°16'	0°23'	0°21'	0°20'	0°28'	0°20'	0°23'	0°33'	0°24'
0,6	0°22'	0°30'	0°28'	0°26'	0°38'	0°28'	0°30'	0°43'	0°32'
0,4	0°31'	0°47'	0°41'	0°39'	0°56'	0°41'	0°46'	1°6'	0°48'
0,2	0°50'	1°29'	1°15'	1°19'	1°39'	1°13'	1°31'	2°11'	1°37'

Изменение задних углов спирального сверла при плоской задней поверхности.

Задние углы у спиральных сверл задаются в сечении, касательном к круглой цилиндрической поверхности, концентричной оси сверла α_u , это будет инструментальный рабочий угол α_{pc} .

В статической системе координат этот угол вдоль режущей кромки определяется по зависимости [16]:

$$tg\alpha_{pcx} = \frac{\cos \mu_x \cdot tg\alpha_u + ctg\varphi_u \cdot \sin(\mu_x - \mu)}{\cos \mu},$$

где $\alpha_u = \alpha$ известны, заданы на чертеже; $\sin \mu = \frac{R_x}{R}$ (r – радиус сердцевины сверла, R – радиус сверла).

Таблица 4 – Изменение задних углов вдоль режущей кромки спирального сверла в инструментальной и статической системах координат.

$\frac{R_x}{R}$	φ	Инструментальная система координат				Статическая система координат			
		$\alpha=6^\circ$		$\alpha=12^\circ$		$\alpha=6^\circ$		$\alpha=12^\circ$	
		$\alpha_{ин}$	$\alpha_{нн}$	$\alpha_{ин}$	$\alpha_{нн}$	α_c	$\alpha_{нс}$	α_c	$\alpha_{нс}$
1	45°	4°17'	4°19'	8°41'	8°44'	4°16'	4°17'	8°38'	8°41'
0,8		5°51'	5°54'	10°15'	10°20'	5°48'	5°51'	10°10'	10°15'
0,6		8°31'	5°39'	12°55'	13°7'	8°23'	8°30'	12°43'	12°55'
0,4		14°10'	14°40'	18°35'	19°13'	13°38'	14°7'	17°54'	18°31'
0,2		40°42'	45°25'	45°27'	50°10'	32°27'	36°52'	30°40'	41°17'
1	60°	5°14'	5°17'	10°34'	10°40'	5°13'	5°16'	10°32'	10°38'
0,8		6°19'	6°25'	11°39'	11°48'	6°18'	6°22'	11°36'	11°45'
0,6		8°9'	8°21'	13°26'	13°45'	8°5'	8°17'	13°20'	13°39'
0,4		11°55'	12°35'	17°7'	18°2'	11°42'	12°21'	16°49'	17°44'
0,2		26°16'	33°0'	30°59'	38°18'	24°7'	30°29'	28°46'	35°50'
1	90°	6°0'	6°4'	12°0'	12°8'	6°0'	6°4'	12°0'	12°8'
0,8		5°58'	6°4'	11°55'	12°8'	5°58'	6°4'	11°55'	12°8'
0,6		5°53'	6°4'	11°46'	12°8'	5°53'	6°4'	11°46'	12°8'
0,4		5°38'	6°4'	11°16'	12°8'	5°38'	6°4'	11°16'	12°8'
0,2		4°1'	6°4'	8°6'	12°8'	4°1'	6°4'	8°6'	12°8'

При известных инструментальном α и рассчитанном рабочем угле $\alpha_{рс}$ в статической системе координат по зависимостям указанным в табл. 1 определяются главные и нормальные инструментальные задние углы в статической системе координат. Их расчетные значения на режущей кромке для спиральных сверл с $\alpha=6^\circ$ и $\alpha=12^\circ$ приведены в табл. 4.

Анализ изменения главных задних углов на режущей кромке в инструментальной и статической системах координат показывает существенное отличие их значений. При этом с уменьшением угла φ наблюдается более резкое изменение задних углов на режущей кромке. Также при меньших значениях φ разность значений углов $\alpha_{ин}$ и α_c , измеренных в главных секущих плоскостях увеличивается.

Следует отметить, что главные задние углы на режущей кромке существенно меньше, в сравнении с нормальными задними углами меньше и диапазон их изменения, табл. 4.

Согласно формулам определения главных задних углов, табл. 1, в кинематической системе координат они будут меньше статических на угол τ_{Nx} (3). По аналогии со значениями передних углов, угол τ_N не оказывает существенного влияния на изменение кинематических главных задних углов спирального сверла, в сравнении со статическими. Поэтому при анализе геометрии задней поверхности с достаточной точностью (в пределах допуска на угловые размеры сверла) следует использовать статическую систему координат.

Выводы

В статье приведен анализ изменения геометрических параметров на режущей кромке спирального сверла в различных системах координат. Показано, что отличия передних углов спирального сверла в различных системах координат незначительны. Их значения в инструментальной системе координат тождественны значениям, которые определены в статической и кинематической системах координат. Однако, определение геометрии задней поверхности следует проводить в статической системе координат, что в большей степени отображает их значения в процессе резания.

Список литературы: 1. *Родин П.П.* Геометрия режущей части спирального сверла / *П.П. Родин*, Киев: Техника 1971 – 135 с. 2. А.с. №715228 (СССР) Сверло с криволинейными режущими кромками/ *Куцяк Я.В., Векерик В.И., Санчишак В.М.* – опубл. в Б.И. 1980, №5. 3. А.с. №1046038 (СССР) Фасонное сверло / *Родин П.П., Татаренко В.Н., Робаковский Я.Н., Станиславский В.Н., Равская Л.В.*, – опубл. в Б.И. 1984, №2. 4. А.с. №1065109 (СССР) Сверло с подточкой поперечной режущей кромки/ *Дибнер Л.Г. Лапиц Б.А. Жилис В.И. Конников М.Н.*– опубл. в Б.И. 1984, №7. 5. А.с. №1085702 (СССР) Сверло фасонное / *Родин П.П., Фигурин Ю.И. Татаренко В.Н.* – опубл. в Б.И. 1984 №13. 6. А.с. №1133044 (СССР) Сверло спиральное двухперовое / *Яшин Г.Г., Ногин И.С.* – опубл. в Б.И. 1985 №7. 7. А.с. №1151375 (СССР) Спиральное сверло *Скочко Е.В.* – опубл. в Б.И. 1985 №14. 8. *В. Karpushewski, R.S. Turmanidze, L. Dübner. O. Kushnarenko* Erhöhung der standzeit und prozesssicherheit von mikrobohrern durch die entwicklung neuer werkzeuggeometrien. Сучасні технології і машинобудуванні. Зб. Наук. Праць С 56. – Харків : НТУ „ХПІ”, 2008 – 208 с. 9. *Жиров В.И.* Сверла с переточенной перемычкой. / Станки и инструмент 1954 г. №2. 10. *Криштопа Н.А., Родина Т.Г.* Геометрия задних поверхностей сверл и способы их формообразования. К. Вища школа, 1982. 128с. 11. *Жилис В. И.* Современные конструкции спиральных сверл. Под ред. Галея М.Г. Вильнюс , 1966. 12. *Radzevich S.P.* Kinematic Geometry of Surface Machining. CRC Press Taylors Fran Cis Grop 2008 – 508 p. 13. *А.А. Вачев.* Зависимости между инструментальными и рабочими углами – альтернативны на ISO03002/2 1892 (У)// Сборник доклады МНТК по авангардні машиностроители обработки 8МНТК по ведущих производственных операций. Кранево-България 2008, 12с. 14. *Николаенко Т.П., Корбут Є.В.*, Теорія аналітичного визначення геометричних параметрів різальної частини інструментів // Вісник ЖДТУ: вип. 29. Житомир: 2004. с.134-138. 15. *Николаенко Т.П., Мельничук Л.С.*, Общая теория определения геометрических параметров инструментов./ Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць ДДМА – Вип. №14. – 2003. Краматорськ с. 3-11. 16. *Равская Н.С., Охрименко А.А.* Общая теория определения геометрических параметров режущей части инструментов. Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин. Сборник научных трудов Полоцкого государственного университета. Том 2. 2009, Новополоцк, Беларусь, С 260-265. 17. Общемашиностроительные нормативы времени и режимов резания для нормирования работ, выполняемых на универсальных и многоцелевых станках с числовым программным управлением: Часть II. Нормативы режимов резания. – М.: Экономика. 1990.

В. К. СТАРКОВ, д-р техн. наук, Москва, Россия

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ДОСТИЖЕНИЯ ПРЕДЕЛЬНОЙ СКОРОСТИ РЕЗАНИЯ

На основі дислокаційних уявлень фізики пластичної деформації й руйнування, зроблений теоретичний прогноз про можливість різання металів зі швидкістю, близької до швидкості звуку.

На основе дислокационных представлений физики пластической деформации и разрушения, сделан теоретический прогноз о возможности резания металлов со скоростью, близкой к скорости звука.

On basis of dislocation conceptions of physics of plastic deformation and destruction, was made theoretical prognosis on possibility of cutting of metals with speed, similar to speed of a sound.

История становления и развития теории резания – это история непрерывного поиска путей повышения его производительности и, прежде всего, за счет увеличения скорости обработки.

Експериментально установленная и широко используемая на практике связь между скоростью резания и износом (стойкостью) режущего инструмента послужила базисом для придания скорости резания релевантного статуса эффективности технологических систем формоизменения удалением стружки.

Достигнутая скорость резания в настоящее время стала критерием обрабатываемости конструкционных материалов, режущей способности инструментальных материалов и инструмента, технического уровня станочного оборудования и технологического процесса механической обработки в целом.

Повышение скорости резания, как и в других технических отраслях, стало мотивирующим фактором дальнейшего совершенствования всех элементов системы резания.

Анализ экспериментальных данных. К настоящему времени для уровня скоростей, достижимых современными инструментальными материалами, сложилась общепринятая точка зрения влияния скорости резания на основные его функциональные параметры – силу и температуру. Эти параметры характеризуют сопротивление

обрабатываемого материала резанию, по которым можно судить о интенсивности его деформации и контактных явлений.

Неоднократно экспериментально подтвержденная точка зрения сводится к тому, что с увеличением скорости резания сила уменьшается, а измеренная контактная температура – возрастает. Причем общим для этих закономерностей является стабилизация значений силы и температуры при достижении конкретных величин скорости резания. Конкретность величин V при этом обусловлена обрабатываемым материалом, видом обработки, его технологическими параметрами и т.д.

В качестве наглядной иллюстрации изложенного можно рассмотреть результаты Е.Д. Саломоновича измерений температуры при продольном тчении образцов углеродистой и хромистой стали, чугуна и цветных металлов: цинка, латуни и алюминия. Средняя температура в контакте резца со стружкой определялась методом естественной термопары (рис. 1).

Предельная скорость резания в экспериментах достигала 2000 м/мин. Из рис. 1 следует, что с увеличением скорости резания температура также растет и ее величина стабилизируется, достигая предела, равного температуре плавления обрабатываемого металла. Отмеченный эффект связан с измеренной температурой металла в состоянии, близком к его расплавлению.

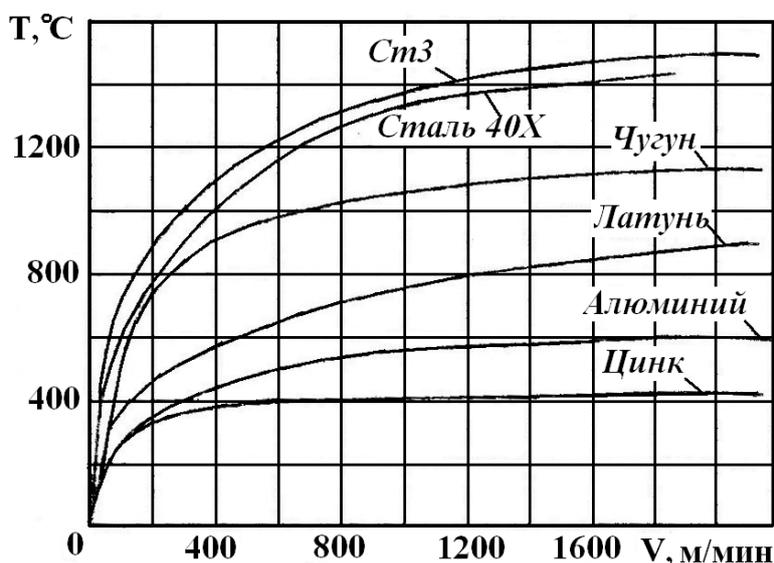


Рисунок 1 – Влияние скорости резания на температуру при тчении различных материалов

Зеркально отраженная закономерность наблюдалась многими исследователями при изучении влияния скорости на силу резания (см.,

например, работу С.С. Силина, где совмещено изменение температуры и силы от скорости обработки [1].

Интрига в ситуации с возможностью увеличения скорости резания до предельных, пока неясно каких значений была заложена работой немецкого инженера К. Саломона, опубликованной более 70 лет назад. Исследуя отрезку алюминиевых листов дисковой фрезой большого диаметра при различных скоростях резания – до 16500 м/мин, он пришел к выводу, что с увеличением скорости обработки температура резко возрастает, а затем столь же резко падает. Таким образом, существует, по его мнению, две критические скорости резания, ограничивающие диапазон крайне неблагоприятных условий резания по причине высокой температуры нагрева [2].

В исследованиях со скоростями резания до 72000 м/мин, выполненных американскими учеными в более позднее время – в 60-е годы прошлого века, не был зафиксирован какой-либо заметный износ инструмента, а стружкообразование происходило вследствие крошения обрабатываемого металла. При высокоскоростной обработке с определенной величиной подачи было отмечено незначительное повышение температуры. Пластическая деформация при сверхскоростном резании является процессом адиабатическим, а наблюдаемое уменьшение сил и температур становится следствием изменения характера деформации [2].

В описанных выше экспериментах достигнутая скорость резания не превысила $1/5$ скорости звука, с которой в металлофизике сопоставляются скорости протекания физико-химических явлений атомарного масштаба, включая зарождение и движение дефектов кристаллической решетки.

С помощью энергии взрыва бризантных взрывчатых веществ В.В. Швецу, И.Г. Гриченко и Б.П. Рыковскому удалось достичь более высокого предела: расчетная скорость резания была увеличена до 5800 м/с. Неподвижный резец из быстрорежущей стали Р18 должен был прорезать паз в образце, движущимся в вакуумной камере под действием взрывной волны. В условиях сверхскоростного резания изучалось поведение образцов из алюминиевых сплавов Д16А, АМГ-6 и титанового сплава ВТЗ-1.

В качестве процесса резания использованная схема может рассматриваться лишь условно, т.к. при ударе образца о резец он терял свою скорость и, дальнейшее его поведение становилась непредсказуемым. Тем не менее, поведение обрабатываемого материала в условиях, имитирующих его обработку со снятием стружки, на скоростях, ранее

недоступных для исследований, представляет определенный интерес для последующих прогнозов.

Основные итоги проведенных экспериментов можно свести к следующему. При скоростях 115 и 1080 м/с на образцах из алюминиевых сплавов Д16А и АМГ-6 удалось прорезать пазы с минимальными следами пластической деформации. После прорезания паза на скорости 1080 м/с вершина резца оказалась разрушенной.

Этими результатами было продемонстрирована принципиальная возможность резать металл в использованной экспериментальной установке с помощью энергии взрыва. Опыты с более высокими скоростями показали неожиданные результаты: при обработке со скоростями 2260 и 5800 м/с образцы из алюминиевого сплава Д16А и титанового сплава ВТЗ-1 в момент удара резца разрушились.

Теоретические оценки предельной скорости резания. В теории резания, которая базируется в основном на описании обработки материалов лезвийным инструментом, нет однозначного представления о влиянии сверхвысоких скоростей резания на выходные параметры процесса. Противоречивость прогнозных оценок объясняется неопределенностью возможной реакции обрабатываемого материала на воздействие режущего клина при околосвуковой и звуковой скоростях. Именно к таким скоростям приближается современная технология шлифования, рабочие скорости которой на два-три порядка превышают достигнутый уровень в лезвийной обработке.

Перспективы и целесообразность применения высоких и сверхвысоких скоростей при обработке резанием можно оценить с помощью положений теории дислокаций. Резание материалов идентифицируется с процессом их пластического деформирования. Поэтому увеличение скорости резания прямым образом зависит от возможности повышения скорости пластической деформации.

Предельная скорость пластической деформации. Чтобы повысить скорость деформации, необходимо увеличивать действующую нагрузку. Если при скорости деформации до $\dot{\epsilon}=10\text{с}^{-1}$ напряжение деформирования возрастает незначительно, то при скорости деформации свыше 10^4с^{-1} характер кривой напряжение-деформация изменяется радикально (рис. 2) [3].

На рис. 3 представлены зависимости скорости деформации от действующего напряжения при деформировании, как и на рис. 2, высокочистого алюминиевого сплава. Из рис. 3 следует, что напряжение текучести как функция деформации возрастает с увеличением скорости деформации. По приведенным результатам можно заключить, что в

исследованном интервале деформаций и скоростей деформаций существует предельная скорость пластической деформации, равная примерно $\dot{\epsilon} = 2 \cdot 10^4 \text{ c}^{-1}$, при которой экспериментальные кривые параллельны оси абсцисс, т.е. не зависят от действующего напряжения.

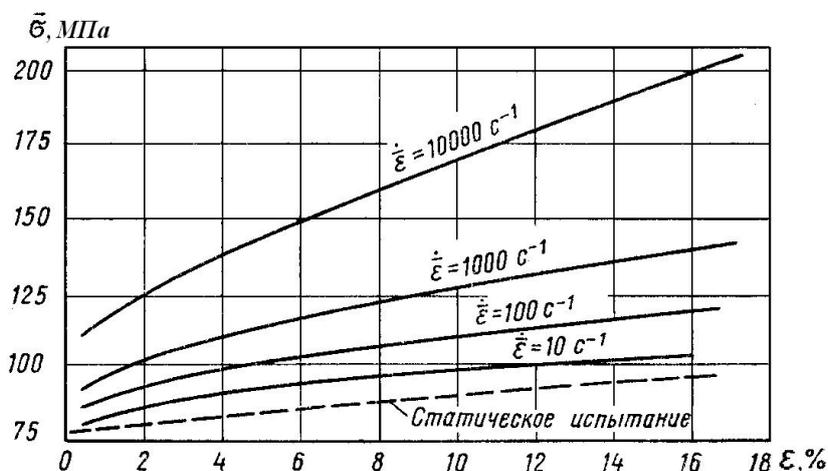


Рисунок 2 – Зависимость напряжения от деформации при постоянной скорости деформации для алюминия высокой чистоты [3]

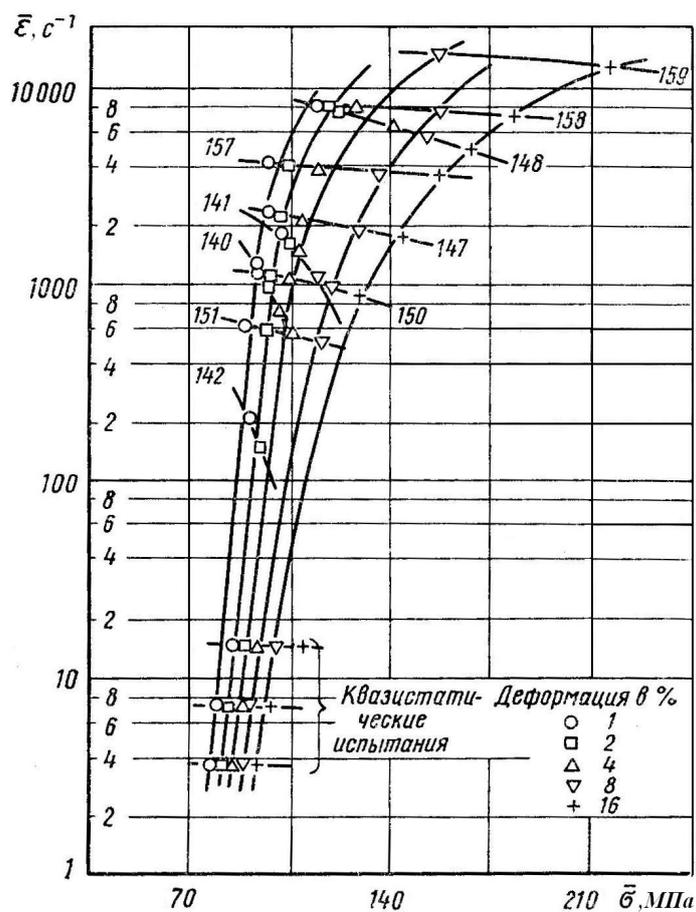


Рисунок 3 – Зависимость скорости деформации от напряжения при постоянной величине деформации (показаны образцы экспериментальных записей) [3]

В работе [3], в которой приводятся эти данные, дано объяснение установленному характеру связи $\dot{\epsilon}$ - σ процессом пересечения дислокаций, как механизма, контролирующего скорость деформации. В связи с чем делается предположение, что предельно достижимой скоростью деформации является предельно возможная скорость движения дислокаций.

При высокоскоростной деформации с чрезвычайно высокими значениями приложенного напряжения резко возрастает скорость перемещения дислокаций по плоскости скольжения. В результате соответствующего увеличения сопротивления кристаллической решетки ускоренному движению дислокаций обеспечивается дополнительный прирост прочности при высокоскоростной деформации по сравнению с квазистатическим деформационным упрочнением.

Ранее упоминалось, что материал деформируется путем движения краевых и винтовых дислокаций, причем скорость перемещения краевых дислокаций до 50 раз больше, чем винтовых. Возможность более быстрого движения краевых дислокаций обычно объясняют их способностью оставаться в пределах одной плоскости скольжения. Но винтовых дислокаций с точки зрения статистической физики в деформируемом объеме зарождается до 2 раз больше, чем краевых, поскольку энергетических затрат на их зарождение требуется меньше. Поэтому пластическая деформация протекает как процесс одновременного зарождения и движения краевых дислокаций, которых меньше, но двигающихся с более высокой скоростью, и винтовых дислокаций, которых, однако, имеется в большем количестве, чем быстрых краевых дислокаций.

Можно, по-видимому, утверждать, что при относительно небольших скоростях деформаций процесс деформирования протекает преимущественно в результате движения медленных винтовых, но энергетически более предпочтительных, чем краевые дислокации. С повышением скорости деформации приоритет в ее реализации все более смещается в сторону активности быстрых краевых дислокаций, тем более, что возрастающая нагрузка деформирования обеспечивает необходимые предпосылки для их инициирования в возрастающих количествах.

Теперь необходимо найти ответ на вопрос, как быстро может перемещаться дислокация, чтобы обеспечить предельную скорость пластической деформации, и может ли она достигать, например, скорости звука в деформируемом материале?

На существование критической скорости движения дислокации, величина которой меньше скорости звука, впервые указали Я.И. Френкель и Т.А. Конторова.

Действительно, такой вывод следует из уравнения волновой механики сплошных сред для малых пластических деформаций, где уравнение движения имеет вид

$$\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 W}{\partial \tau^2}, \quad (1)$$

где τ – время, c – скорость волн сдвига в данной среде или скорость звука.

Во-первых, скорость дислокации не может превышать скорости звука, т.к. дислокация – это по существу сигнал, который можно разложить методом Фурье на плоские волны деформации (звуковые волны или фотоны). Но, как известно, сигнал не может перемещаться быстрее волн, которые его переносят.

Во-вторых, практический предел скорости достигается, когда энергия, которую движущаяся дислокация получает от прилагаемой нагрузки, компенсируется той энергией, которую дислокация теряет вследствие различных диссипативных процессов. Поэтому предельная скорость движения дислокации и, соответственно, пластической деформации не может достигнуть скорости звука.

В предыдущем тексте представленной монографии уже излагались различные точки зрения на скорость перемещения дислокаций. Отметим, что по теории дислокаций скорость движущихся дислокаций должна быть ограничена скоростью поперечных волн сдвига, величина которой рассчитывается через отношение модуля сдвига деформируемого материала к его плотности. Эта величина меньше скорости звука, за которую принято считать скорость распространения продольных звуковых волн, вычисляемых через отношение модуля упругости и плотности.

Эшелби, Виртман, Окави и другие исследователи привели ряд теоретических соображений, из которых следует, что краевые дислокации могут иметь сверхзвуковые скорости перемещения [4].

Например, была предложена схема сверхзвуковой краевой дислокации. По Эшелби атомы, расположенные выше плоскости скольжения, могут занимать два положения (рис.4). Справа от дислокации, обозначенной на рисунке через А, положение неустойчивое, а слева от него устойчивое. Положение атомов справа от А может быть изменено, если они переместятся влево и займут устойчивое положение. Энергия неустойчивого положения атомов в кристаллической решетке создает необходимую движущую силу, которая определяет перемещение дислокаций. Если все атомы, расположенные справа от А, одновременно переместятся из своих

неустойчивых позиций, то дислокация будет двигаться в направлении, указанном стрелкой, с бесконечно большой скоростью.

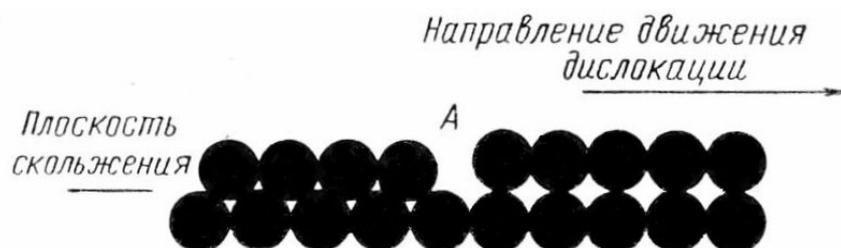


Рисунок 4 – Образование сверхзвуковой дислокации по Эшелби.

В действительности же пока отсутствуют экспериментальные данные, подтверждающие существование сверхзвуковых дислокаций, а исследованные скорости движения дислокаций в дозвуковом интервале не достигают скорости звука по крайней мере на порядок.

Предельная скорость разрушения. Разберем некоторые теоретические аспекты повышения скорости разрушения металлов, которая сопровождается предшествующей ему пластической деформацией.

Из опытов известно, что существует критическая скорость распространения трещин, выше которой не происходит пластической релаксации [5, 6, 7].

Движущей силой распространения трещины является энергия деформации W , которая уравнивается поверхностной энергией γ и кинетической энергией E_k

$$E_k = \beta \frac{\dot{\epsilon}^2}{c_0^2 W}, \quad (2)$$

где c_0 – скорость волн напряжения и β – постоянная, связанная с разделением поверхностей трещины.

Тогда предельная скорость распространения трещины Гриффитса равна

$$V_c = \beta c_0 \left[1 - \frac{\gamma}{W} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

и составляет около 1/3 скорости звука в материале.

Выше предельной скорости распространения трещины необходимая энергия разрушения составит

$$U_p \approx 2\gamma \approx 0,2aG. \quad (4)$$

Такую величину энергии, необходимую для разрыва атомных связей, можно получить в результате концентрации напряжений в локализованной области разрушения. Необходимый эффект может быть получен в результате повышения скорости воздействия инструмента, что обеспечит повышенную плотность поступающей энергии.

Действительно, при значительном увеличении скорости воздействия неоднородность напряженного состояния в объеме несколько резко увеличивается, что возникают локальные сильно деформированные зоны, только непосредственно прилегающие к месту воздействия.

Следовательно, при повышении скорости воздействия свыше предельной скорости распространения трещины разрушение будет являться абсолютно хрупким. Скорости распространения волн напряжения в твердых телах заключены приблизительно в интервале от 900 до 6000 м/с, предельная же скорость распространения трещин лежит в пределах 1500...2000 м/с. Таким образом, область абсолютно хрупкого разрушения, когда справедливо выражение (4) примерно составляет $2000 < V_c < 6000$ м/с.

С другой стороны, скорость звука в физике твердого тела рассматривается по существу как сигнал, который переносится в периодической атомной структуре волнами деформации. При скорости выше скорости распространения сигнала, разрушение можно рассматривать как сдвиг путем мгновенного разделения атомных слоев вдоль всей плоскости разрушения. Необходимая энергия разрушения в этом случае может быть определена из схемы жесткого сдвига двух атомных плоскостей.

Сила, необходимая для того, чтобы сдвинуть верхнюю атомную плоскость относительно нижней, является периодической функцией с периодом a и симметричной для $x > 0$ и $x < 0$. Простейшая функция, удовлетворяющая этим условиям, в теории упругости есть

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{Ga^3}{2\pi d} \sin \frac{2\pi x}{a}, \quad (5)$$

$$U_p = \int F dx = -\frac{Ga^4}{4\pi^2 d} \cos \frac{2\pi x}{a} + C. \quad (6)$$

при $x = 0$, $C = \frac{Ga^4}{4\pi^2 d}$

$$U_p = \frac{Ga^4}{4\pi^2 d} \left(1 - \cos \frac{2\pi x}{a}\right), \quad (7)$$

с максимумом

$$U_p = \frac{Ga^4}{4\pi^2 d} \quad (8)$$

По расчетам энергия разрушения при скорости свыше скорости звука будет в 4 раза меньше энергии разрушения в интервале скоростей $V_c < V < V_{зв}$. В данном случае следует, однако, говорить лишь о снижении сопротивления обрабатываемого материала разрушению, так как достижение высоких скоростей инструментом требует больших затрат энергии.

Возможность разрушения металлов при сверхзвуковых скоростях рассматривает и волновая механика сплошных сред, исследуя разрушение металла как результат действия напряжений высоких амплитуд. В этом случае амплитуды напряжений превышают на несколько порядков значения начальных пределов текучести и становятся сравнимыми, или даже превышают значение модуля упругости. Сопротивление среды принимается почти пренебрежимо малым при описании природы движения, а механическое поведение материала аппроксимируется как поведение жидкости.

Повышение скорости разрушения выше скорости звука интересно и с другой точки зрения. Как известно, скорость распространения тепловых волн определяется скоростью звука. Поэтому следует ожидать при сверхзвуковых скоростях «отставание» теплового потока. На практике это подтверждается уменьшением коэффициента теплопроводности металлов с увеличением скорости обработки.

Известны также и теоретические предложения о предельной скорости разрушения [8]. С учетом кинетической энергии трещины максимально возможная скорость распространения разрушения в твердом теле по Мотту составляет 0,38 от скорости звука, а в рамках чисто упругой задачи П.О. Пашковым этот предел увеличен до 0,4 скорости звука.

При использовании идеи о том, что предельная скорость трещины лимитируется величиной скорости, при которой начинается процесс ее ветвления, были получены различные оценки предельно возможной скорости разрушения от 0,53...0,8 скорости поперечных волн и 0,5...0,65 скорости продольных волн.

В.М. Финкель [8], проанализировав результаты измерений скоростей разрушения приведенных в 30 опубликованных источниках, пришел к выводу, что наибольшие из известных скоростей разрушения приближаются к скорости, составляющей 0,38 скорости продольных упругих волн в стали. Этот вывод получен на широком круге материалов:

хрупких (стекло, монокристаллы, алмазы и др.) и пластичных (углеродистые и легированные стали).

При разрушении сталей типа Ст 3, 25,35, 50, 65, У8А, 35ХГ2, ШХ15, 85ХВ, 65Г, трансформаторная сталь с содержанием углерода в 3,5% и др. скорость распространения трещины, измеренная по различным методикам, в большинстве случаев указывается в диапазон от 1117 до 3000 м/с, что составляет 0,17...0,51 скорости звука, соответствующей конкретному испытанному материалу. Только в одном случае из 22 исследованных вариантов зарегистрированная скорость разрушения достигла значений 4000...5000 м/с или 0,71...0,91 от скорости звука.

Тем не менее, автор исследования [8] утверждает, что экспериментально пока не обнаружено какой-либо предельной скорости, выше которой пластическая деформация отсутствовала, а наблюдалось монотонное ее убывание с увеличением скорости трещины вплоть до предельно возможных скоростей.

Трещина, распространяющаяся с некоторой скоростью, возбуждает дислокационные источники в окрестностях своей вершины и освобождает их от влияния примесей. С ростом скорости трещины время ее воздействия на источники уменьшается, что ведет к уменьшению пластической деформации вблизи трещины и в конечном итоге на полостях разрушения. Это объяснение позволяет объяснить механизм существования пластической деформации даже при очень больших скоростях распространения трещины в реальных материалах, т.е. с наличием примесей или предварительно деформированных. Если бы в материале вблизи движущейся трещины отсутствовали источники дислокаций, то описанный механизм лишается смысла. Тогда должна существовать некоторая критическая скорость, выше которой зарождение дислокаций движущейся трещиной было бы исключено, а разрушение только в этом случае можно рассматривать как абсолютно хрупкое.

При разрушении металлов возможно отсутствие или второстепенное влияние источников дислокаций вблизи движущейся трещины. Основная причина уменьшения пластической деформации в вершине трещины с возрастанием ее скорости – инерция незаблокированных дислокационных источников Франка-Рида.

Несмотря на то, что известные эксперименты свидетельствуют о предельных значениях скоростей разрушения, Г.Н. Баренблатт, В.М. Финкель и др. полагают, что вершину трещины можно ускорить и до более

высоких скоростей, если бы удалось обеспечить каким-либо образом ее дополнительное энергоснабжение.

Предельная скорость резания. Теперь необходимо привести к единому знаменателю представленные выше рассуждения о влиянии скорости на пластическую деформацию и разрушение, объединив их для установления предельно возможной скорости резания как процесса управляемого разрушения.

Прежде всего еще раз идентифицируем процесс резания как управляемого разрушения, определив его основные признаки. При управляемом разрушении формирование новых поверхностей является результатом бифуркации обрабатываемого материала вершиной движущейся трещины, профиль которой конгруэнтен или совпадает с профилем режущей кромки.

Для того, чтобы траектория движения вершины трещины соответствовала плоскости резания, заданной кинематикой процесса, необходимо сохранение ее управляемости. Управляемость траектории трещины обусловлена механизмом вязкого разрушения, т.е. при наличии пластической деформации, которая формирует и сопровождает ее движение. При отсутствии пластической деформации характер разрушения становится непредсказуемым.

При повышении скорости резания важно не перейти рубеж, когда образующаяся трещина не начнет ветвиться или спонтанно изменять траекторию своего движения, т.е. войти в скоростной диапазон абсолютно хрупкого разрушения. Такая возможность, как показал анализ, вполне возможна при резании пластичных металлов и сплавов.

Основываясь на существующих теоретических положениях и известных экспериментальных данных, можно принять за величину предельной скорости резания скорость, при которой еще сохраняется пластическая деформация обрабатываемого материала и соответственно функционируют механизмы ее порождающие и поддерживающие.

В этой связи наиболее достоверной границей скорости резания как процесса управляемого разрушения можно принять скорость движения дислокаций, ограниченной скоростью поперечных волн сдвига. Такая оценка соответствует современным представлениям физики твердого тела и находит подтверждение, в том числе, немногочисленными экспериментальными данными по сверхскоростному резанию.

Тогда возможную скорость резания как управляемого технологического процесса съема материала можно ограничить отношением:

$$V \leq \sqrt{\frac{G}{E}} V_{36} \quad (9)$$

Если воспользоваться справочными данными табл. 5.2, то оказывается, что предельная скорость резания составляет 0,6...0,62 от скорости звука в различных конструкционных металлах.

Подчеркнем, что оценка по (9) соответствует существующим общепринятым представлениям о пластической деформации и разрушении материалов. Гипотезы, которые упоминались выше, позволяют отодвинуть границу предельной скорости еще дальше, но их реальность пока не обоснована.

Для основных конструкционных металлов и сплавов на основе Al, Fe, W, Cu, Ni, Ti и других скорость распространения звука в них составляет 3600...5300 м/с и соответственно предельная скорость их обработки резанием может достигать величин 2200...3300 м/с. Это очень высокий уровень, который более, чем на порядок превышает достигнутые скорости резания к настоящему времени.

Рассмотрим теперь физические предпосылки реакции обрабатываемого материала в условиях сверхскоростного резания. Будем исходить из очевидного утверждения, что с увеличением скорости обработки объем пластических деформаций, предшествующих разрушению, уменьшается, а роль собственно процесса разрушения в энергетическом балансе возрастает.

Разрушение – это процесс, в результате которого края формирующейся трещины раздвигаются на расстояние b , равное по порядку величины межатомному расстоянию a . Энергия, которая затрачивается на сопротивление распространению трещины в результате пластической релаксации, определяется выражением [9]

$$W \approx \frac{\sigma_c \cdot b}{\pi(1-\mu)} \ln \frac{R}{b}, \quad (10)$$

где σ_c – предел упругости, численно совпадающий с величиной предела пропорциональности, R – размер пластической зоны вокруг трещины

$$\frac{R}{b} \approx \frac{G}{\sigma_c}.$$

Ширина трещины b может быть вычислена из уравнения Гриффитса для полного изменения энергии трещины

$$\Delta U = 2\gamma \cdot h - \frac{1}{8}\pi(1-\mu)\frac{\sigma^2 b^2}{G} . \quad (11)$$

В уравнении (11) величина σ является напряжением, необходимым для образования дислокации

краевой:
$$\sigma = \frac{Gb}{2\pi(1-\mu)l} \quad (12)$$

винтовой:
$$\sigma = \frac{Gb}{2\pi l} , \quad (13)$$

где l – длина дислокации.

Трещина образуется, если величина энергии ΔU по (6.80) меньше нуля и, следовательно, при выполнении условия

$$\sigma^2 h > \frac{16G\gamma}{\pi(1-\mu)} .$$

Если рассматривать трещину как сверхдислокацию, то при $\mu = 1/3$ получим следующие условия формирования устойчивой трещины

$$b_{\min} \approx 3,7 \cdot \sqrt{ah} , \quad (13)$$

$$b_{\min} \approx 5,5 \cdot \sqrt{ah} , \quad (14)$$

которые соответственно получены для краевой и винтовой дислокаций. Минимальная ширина трещины не может быть меньше межатомного расстояния a , т.е. $b_{\min} \geq \bar{a}$. В предположении о преобладающем влиянии винтовых дислокаций на процесс высокоскоростного разрушения, а также, соблюдая обязательное условие кратности величины вектора Бюргера межатомному расстоянию, принимаем для расчетов значение b_{\min} , равное $6a$.

В табл. проводятся расчетные значения минимальной энергии, необходимой для образования 1 см² новой поверхности для некоторых металлов. В табл. приведена также теоретическая оценка удельной энергии пластической деформации, приведенная к единице объема деформируемого металла.

Ее величина рассчитана с учетом следующих допущений. Дислокации распределены в кристалле беспорядочно как по положению,

так и по знаку. Их перемещение осуществляется также по закону чистой случайности, что подтверждено прямыми экспериментами и на реальных металлах. Чтобы осуществить работу пластической деформации, дислокации должны переместиться на заметное расстояние λ , которое принимается постоянным для всех стадий деформирования. При своем движении дислокации испытывают сопротивление упругих полей соседних дислокаций. Энергия поля напряжений от дислокаций в деформируемом металле с учетом периодичности их распределения описывается зависимостью (при $b=a$)

$$U = \int \frac{Ga^3}{2\pi r} \left| \sin \frac{r\alpha}{\pi} \right| d\alpha, \quad (15)$$

в которой периодичность поля упругих напряжений, равная среднему расстоянию между соседними дислокациями, принята в виде функции $\left| \sin \frac{r\alpha}{\pi} \right|$.

Энергия поля напряжений от единичной дислокации определяется из (6.85) при условии $x=r$

$$U = \frac{Ga^3}{2\pi} K,$$

где

$$K = \int_0^\pi \frac{\sin \left| \frac{\alpha^2}{\pi} \right|}{V} d\alpha.$$

Значение коэффициента K вычисляется по формуле с помощью подстановки $\alpha^2=y$, $x = \pm\sqrt{y}$, $2\alpha dx = dy$; $d\alpha = \frac{dy}{2\alpha}$. Решением величина K получается равной 0,925.

Перемещаясь на среднее расстояние λ , дислокация $\frac{\lambda}{r}$ раз преодолевает поле упругих напряжений единичной дислокации. Т.к. в единице объема деформируемого металла находится r^{-3} подвижных дислокаций, то энергия деформирования указанного объема будет равна

$$U_{нл} = K \frac{Ga^3}{2\pi} \cdot \frac{\lambda}{r} \cdot \frac{1}{r^3} = K \frac{Ga^3}{2\pi} \lambda \rho^2. \quad (16)$$

Если подставить в (16) значение плотности дислокаций ρ , то получим расчетную зависимость удельной энергии пластической деформации от степени деформации ε

$$U_{nl} = \frac{K}{2\pi} \frac{Ga}{\lambda} \varepsilon^2. \quad (17)$$

По зависимости (17) энергия деформирования единицы объема связана с длиной прогиба дислокаций λ и степенью деформации ε . Достижение критических условий деформирования, когда начинает развиваться процесс разрушения, для каждого металла предопределено характеристическими значениями λ и ε . Предельная скорость деформации, например, определяется как максимально возможные значения относительно удлинения δ или относительного сужения ψ при растяжении. Длина пробега дислокаций λ , являясь переменной величиной на всех стадиях деформирования, уменьшается перед разрушением до минимального значения, соответствующего для состояния с предельной плотностью дислокаций.

Степень деформации и длины пробега дислокаций взаимосвязаны: с увеличением ε уменьшается величина λ . Если принять значение $\lambda=2 \cdot 10^{-3}$ мм и $\varepsilon=0,5$, близкие к реальным, а теоретический объем пластической деформации, необходимый для управляемого разрушения, равным b_{\min} , то получим затраты энергии U_{nl} , приведенные в табл.

Таблица – Плотность энергии разрушения для формирования 1см^2 новой поверхности

Металл	U_p (6.77)	2γ (6.73)	W (6.79)	$U_{пл}$ (6.87)
	$\alpha 10^{-4} \text{Дж/см}^2$			$\alpha 10^{-21} \text{Дж/см}^{-3}$
Алюминий	0,99	0,83	0,16	1,8
Медь	2,40	2,0	0,40	4,4
Железо	2,38	2,0	0,38	5,6
Вольфрам	7,95	4,1	3,85	9,1

Теоретические оценки энергии разрушения при условиях сверхскоростного резания отличаются между собой, но безусловным и очень важным выводом из информации, представленной в табл., является факт, что участие пластической деформации в формировании новой поверхности становится исчезающе малым, которое не оказывает влияния на энергетику процесса.

Этот вывод основан на положениях дислокационной физики деформирования и разрушения без учета трения, роль которого может заметно увеличиться с повышением скорости резания.

В случае локализации энергии разрушения, пропорциональной скорости обработки, с новым интенсивным источником теплообразования от внешнего трения на поверхностях контакта температура обрабатываемого материала может увеличиться до значений $0,4 \dots 0,5$ его температуры плавления и более. Тогда все больше начнут себя проявлять самодиффузионные процессы, что может в принципе привести к пластической деформации и без дислокаций. При определенных условиях взаимодействие дислокационного скольжения с диффузионными процессами может привести к эффекту сверхпластичности, т.е. к очень низкому сопротивлению деформированию при чрезвычайно высокой пластичности металла.

И еще одно важное обстоятельство, связанное с нагревом зоны резания. С увеличением скорости обработки до значений, приближающихся к скорости звука, начнет активно проявляться эффект запаздывания теплового потока. При достижении некоторого значения скорости резания он начнет отставать от движущейся режущей кромки. В качестве примера можно привести эффект отставания звуковой волны от самолета, летящего со сверхзвуковой скоростью.

Список литературы: 1. *Силин С.С.* Метод подобия при резании материалов. М.: Машиностроение, 1979. 152 с. 2. *Потапов В.А., Айзеншток Г.И.* Высокоскоростная обработка. – Обзорная информация/ВНИИТЭМР. М., 1986. 60 с. 3. *Томсен Э., Янг Г., Кобаяши Ш.* Механика пластических деформаций при обработке металлов. М.: Машиностроение, 1969, 503 с. 4. *Эпштейн Г.Н., Кайбышев О.А.* Высокоскоростная деформация и структура металлов. М.: Металлургия, 1971. 197 с. 5. Роль дислокаций в упрочнении и разрушении металлов / отв. ред. В. С. Иванова. М.: Наука, 1965. 180 с. 6. *Старков В.К.* Дислокационные представления о резании металлов. М.: Машиностроение, 1979. 160 с. 7. *Финкель В. М.* Физические основы торможения разрушением. М.: Металлургия, 1977. 359 с. 8. *Финкель В. М.* Физика разрушения. М.: Металлургия, 1970. 376 с. 9. *Фридель Ж.* Дислокации. М.: Мир, 1967. 643 с.

М. Д. УЗУНЯН, д-р техн. наук, Харьков, Украина

ШЛИФОВАНИЕ НАНОСТРУКТУРНЫХ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ

Представлено результати досліджень алмазно-іскрового шліфування наноструктурних твердих сплавів. Показано, що незважаючи на незначно менші значення коефіцієнтів шліфування й більшої питомої енергоємності процесу в порівнянні зі звичайними твердими сплавами, сумарна технологічна собівартість використання нового сплаву істотно нижче; це дозволяє реалізувати підходи, пов'язані з інжинірингом якості і її вартісною оцінкою.

Представлены результаты исследований алмазно-искрового шлифования наноструктурных твердых сплавов. Показано, что несмотря на несколько меньшие значения коэффициентов шлифования и большую удельную энергоёмкость процесса по сравнению с обычными твердыми сплавами, суммарная технологическая себестоимость использования нового сплава существенно ниже; это позволяет реализовать подходы, связанные с инжинирингом качества и его стоимостной оценкой.

Findings of investigation of diamond-spark grinding of nanostructured hard alloys are presented. It is shown that in spite of rather lesser values of G-ratio and greater specific power consumption of process in comparison with conventional hard alloys, the total technological cost price of new alloy application is substantially smaller; it allows to realise the approaches linked with quality engineering and its cost estimation.

В настоящее время перспективы развития высоких технологий связаны с одним из основных направлений в этой области – нанотехнологиями, которые занимаются созданиями наноструктур. Расширение областей применения этих технологий является важным вкладом в становлении нового технологического уклада, под которым следует понимать совокупность технологий, определяющих общий уровень экономики.

В связи с этим разработка и создание новых инструментальных материалов, а также поиск эффективных методов их использования (наноинженерия) является одним из факторов, способствующих эффективной обработке современных конструкционных материалов.

Именно поэтому во всем мире резко увеличивается производство тонкодисперсных твердых сплавов. В соответствии с современной классификацией в зависимости от величины зерна карбидной фазы,

тонкодисперсные твердые сплавы подразделяются на субмикронные с размером зерна 0,5-1,2 мкм, ультрадисперсные – 0,2-0,5 мкм и наноразмерные – менее 0,2 мкм; при этом задача повышения качества твердых сплавов решается в основном путем наноструктурирования.

По нашему мнению важно отметить, что в настоящее время при разработке новых инструментальных материалов основное внимание уделяется созданию нанокompозитов на основе карбидов с металлами – связками, например WC/Co, которые значительно превосходят по прочности, износостойкости, ударной вязкости и другим физико–механическим свойствам аналогичные материалы с традиционной зернистой структурой. Высокие характеристики таких наноструктурных материалов объясняются тем, что между частицами разных фаз (например, WC и Co) формируются трехмерные контакты с более прочной структурой. Однако, следует обратить внимание, что упомянутые материалы получают механическим перемешиванием соответствующих порошков с последующим холодным прессованием и затем спеканием. Сложностью этой технологии и ее недостатком является механическое перемешивание ультрадисперсных порошков карбида вольфрама и кобальта, что не позволяет получать достаточно надежную степень однородности, а в спеченных твердых сплавах не обеспечивается наноструктурная размерность зерен [1]. Кроме того, при обработке с высокими скоростями температура в зоне резания может достигать 800 – 1000 °C; такой уровень температур резания способствует размягчению кобальтовой связки и как следствие, уменьшению твердости инструментального материала и снижению износостойкости инструмента.

В связи с этим представляет интерес разработанный на основе монокарбида вольфрама новый наноструктурный твердый сплав «ВолКар» [2]. Особенностью этого материала является то, что он состоит только из зерен WC, имеющих размер до 100 нм, и в его составе нет связующих материалов (кобальта, никеля и др.); исходный материал до прессования по специальной технологии представляет собой порошок WC с размерами зерен 40–70 нм. Высокие физико–механические свойства твердого сплава «ВолКар» по сравнению с известными материалами обусловлены высокодисперсными зернами и прочными граничными связями между ними, что объясняется малым временем и сравнительно невысокой температурой спекания [3]. По классификации наноматериалов по форме и химическому составу твердый сплав марки «ВолКар» можно отнести к следующим группам: по расположению кристаллитов и границ

раздела – к четвертой группе, т.е. к равноосным, а по химическому составу – к первой группе, к наноматериалам с одинаковым химическим составом кристаллитов и границ раздела [4].

Рассматриваемый материал перспективен для применения в режущих инструментах при высокоскоростной обработке резанием различных труднообрабатываемых закаленных сталей и сплавов, и в некоторых случаях может заменить дорогостоящий инструмент из кубического нитрида бора; его физико-механические свойства представлены в таблице.

Таблица –Основные физико-механические свойства пластин из «ВолКар»

Твердость, HRA	95...97
Твердость HV, ГПа	23...25
Плотность, мг/м	14,5
Прочность при сжатии, МПа	2600...2800
Прочность при изгибе (T = 20...900°C), МПа	600...800
Теплопроводность, Вт/мК при 22°C при 400°C	20 30
Трещиностойкость K_{Ic} , МПа·м ^{-1/2}	8,5...12

Формообразование рабочих поверхностей режущих инструментов из сплава «ВолКар» можно реализовать только в процессе алмазного шлифования. При этом наиболее целесообразно с учетом свойств материала обработку производить с введением дополнительной энергии в зону шлифования, что обеспечит стабильную развитость рельефа алмазного круга. Естественно предположить, что обладая повышенными по сравнению с обычными твердыми сплавами физико-механическими свойствами, сплав «ВолКар» характеризуется особенностями взаимодействия с рабочей поверхностью круга.

Одним из наиболее распространенных критериев оценки этого взаимодействия является коэффициент шлифования ($K_{ш}$). Он отражает процесс резания в динамике, влияние температурно-скоростного фактора, характеризует свойства обрабатываемого материала, условия внедряемости рельефа в него, а значит и сравнительную режущую способность круга, поскольку процесс осуществляется по упругой схеме шлифования. Рассматриваемый критерий меньше единицы и при определенных условиях обработки может приближаться даже к коэффициенту трения пары – шлифовальный круг – обрабатываемый материал [5].

Коэффициент шлифования определяется из соотношения:

$$K_{ш} = \frac{P_z}{P_y}, \quad (1)$$

где P_z – тангенциальная сила резания, Н; P_y – радиальная сила резания, Н.

Экспериментальные исследования проводились на универсально-заточном станке модели 3Д642Е, модернизированном для обработки методом алмазно-искрового шлифования (АИШ). Шлифование осуществлялось торцом круга 12А2-45° АС6 на металлической связке М1-01 с обратной полярностью подсоединением положительного полюса источника питания к алмазному кругу, а отрицательного – к обрабатываемому материалу. Источником питания являлся специальный генератор импульсов. Электрические режимы составляли: величина технологического тока $I_{cp} = 5\text{А}$, частота электроимпульсов $f = 22\text{кГц}$, скважность $n_{скв} = 2$. Изучалось влияние режимов резания – нормального давления (P_n), скорости резания (V) и характеристик алмазного круга – зернистости (Z), концентрации (K); а также – времени шлифования (T). Для сравнения исследовался $K_{ш}$ при шлифовании пластин из твердого сплава ВК6.

В условиях АИШ во всем диапазоне увеличения нормальных давлений $K_{ш}$ возрастает (рис. 1), что объясняется развитостью рабочей поверхности круга, высокой внедряемостью режущих микрокромки и, как следствие, опережающим ростом силы P_z . Дальнейшее повышение нормального давления приводит к замедлению роста силы P_z из-за некоторого притупления режущих элементов и периодически появляющейся вероятности контакта связки круга с обрабатываемым материалом. При АИШ взаимодействие обрабатываемого материала с кругом определяется в основном характером контактирования его с алмазными зёрнами, трение связки занимает небольшую долю в общей работе шлифования и оказывает слабое влияние на изменение тангенциальной силы P_z .

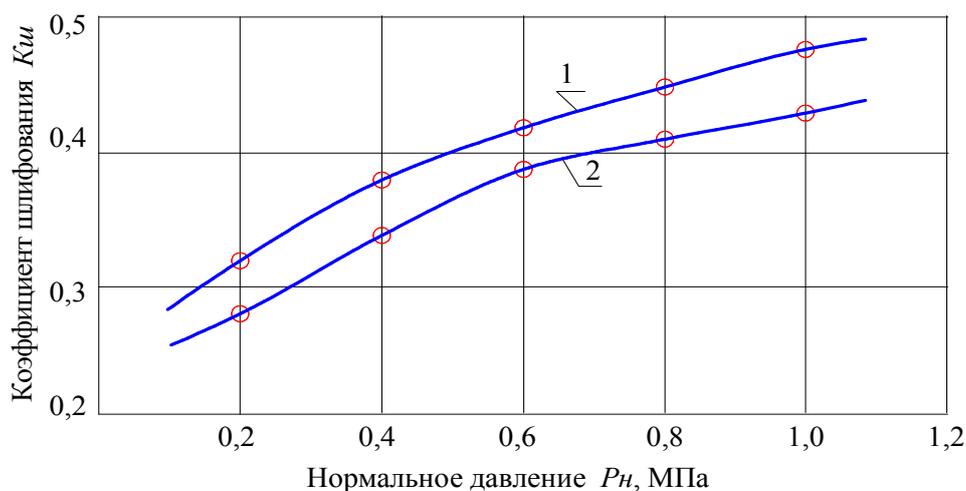


Рисунок 1 – Влияние нормального давления на коэффициент шлифования
1–ВК6, 2 – «ВолКар»; $V=25$ м/с; круг 12А2-45° АС6 100/80 М1-01-4.

Изменение скорости резания от 15 до 35 м/с оказывает весьма незначительное влияние на $K_{ш}$ (рис. 2), что связано с постоянством сил резания при алмазно-искровом шлифовании, и может быть объяснено практически мало изменяющимся значением коэффициентов трения алмаза с обрабатываемым материалом при повышении скорости шлифования. Известно, что при точении материалов, не вступающих во взаимодействие с алмазом, и когда практически имеет место чистый контакт его с обрабатываемым материалом, силы резания с увеличением скорости также не изменяются [6].



Рисунок 2 – Влияние скорости резания на коэффициент шлифования 1–ВК6, 2 – «ВолКар»; $P_n=0,8$ МПа; круг 12A2-45° AC6 100/80 M1-01-4.

При алмазно-искровом шлифовании изменение зернистости в диапазоне от 50/40 до 160/125 незначительно влияет на $K_{ш}$ (рис. 3), что объясняется ростом сил резания в связи с количественным фактором и соответственно возрастанием суммарного сечения среза. Можно предположить, что количественный фактор с повышением зернистости при АИШ твердых материалов не играет существенной роли, так как у кругов повышенных зернистостей крупные зерна, имеющие более низкую динамическую прочность по сравнению с мелкими зернами, при износе и поверхностном разрушении образуют большое количество микрокромки, и таким образом фактор зернистости в этих условиях нивелируется.

Поскольку алмазно-искровое шлифование обеспечивает активную самозатачиваемость режущего рельефа и рабочая поверхность круга практически не засаливается [7], то при шлифовании твердого сплава «ВолКар» также как и обычных твердых сплавов коэффициент шлифования $K_{ш}$ в течении длительного промежутка времени практически не изменяется (рис. 4). Только в условиях шлифования, когда режущая поверхность приобретает устойчивый характер, и круг работает в режиме самозатачивания при весьма незначительном контакте связки с

материалом, по величине $K_{ш}$ можно устанавливать сравнительную обрабатываемость любых твердых сплавов, а именно – большим значения $K_{ш}$ соответствует лучшая обрабатываемость.

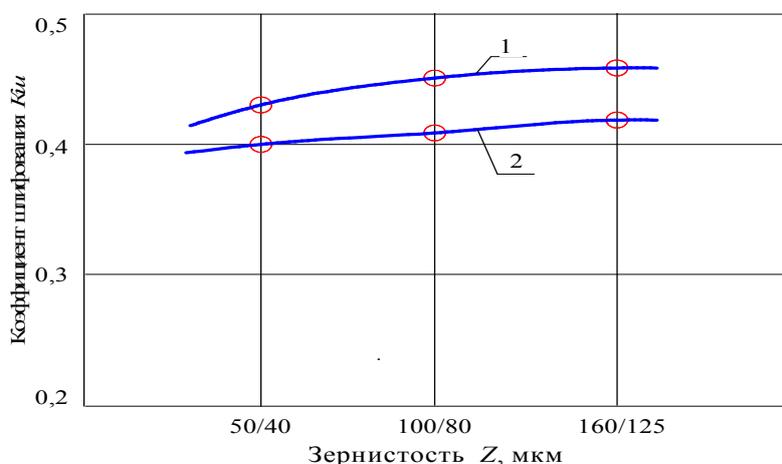


Рисунок 3 – Влияние зернистости кругов на коэффициент шлифования 1–VK6, 2 – «ВолКар»; $P_H=0,8$ МПа; $V=25$ м/с; круг 12A2-45° AC6 M1-01-4.

Представляет интерес и анализ изменения удельной энергоёмкости в зависимости от продолжительности шлифования наноструктурного твердого сплава «ВолКар» (рис.5). При этом удельная энергоёмкость (B_m) шлифования определялась отношением энергии (работы A), расходуемой в единицу времени на снятие массы (ΔM) материала [8]:

$$B_m = \frac{A}{\Delta M}, \quad (2)$$

где A – работа, Дж; ΔM – масса, кг.

Работа шлифования (A) рассчитывалась как произведение тангенциальной силы резания (P_z) и скорости резания (V), а масса материала определялась исходя из объема снятого материала в единицу времени (производительность Q_m) и его плотности. Тангенциальная сила резания (P_z) измерялась по упругой схеме шлифования с помощью специального динамометра.

При алмазно–искровом шлифовании режущая способность кругов на металлической связке сохраняется практически постоянной в течении длительного промежутка времени. Удельная энергоёмкость шлифования твердого сплава «ВолКар» при АИШ, также как и сплава VK6, изменяется весьма незначительно, что свидетельствует о пропорциональном изменении работы резания и соответствующем ей съеме материала во времени.

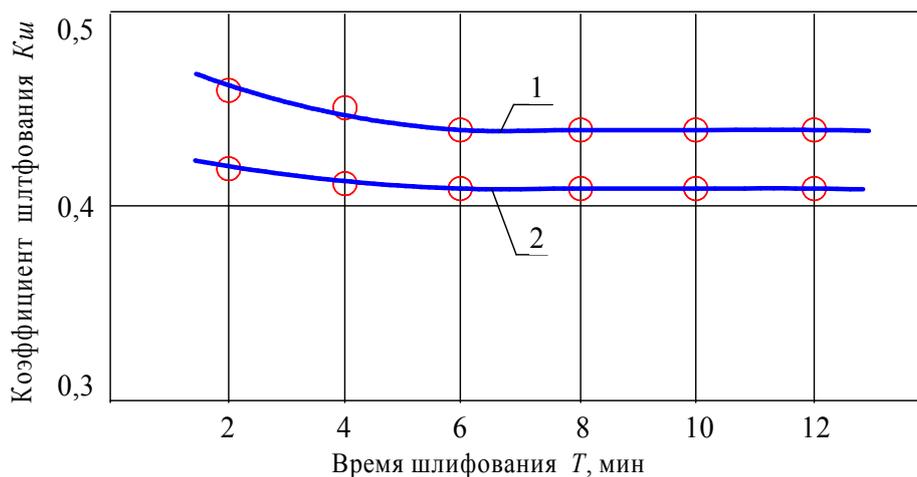


Рисунок 4 – Влияние времени шлифования на коэффициент шлифования
 1–VK6, 2 – «ВолКар»; $P_H=0,8$ МПа; $V=25$ м/с;
 круг 12A2-45° AC6 100/80 M1-01-4.

Результаты исследований показывают, что при шлифовании твердого сплава «ВолКар» имеют место несколько меньшие значения $K_{ш}$ и большие V_m по сравнению со сплавом VK6, что вызовет незначительное увеличение удельной себестоимости шлифования $C_{ш}$. Однако, следует иметь в виду, что удельная себестоимость шлифования и заточки не отражает качественное состояние изделий и инструмента в реальных условиях эксплуатации; потребителя интересует надежность приобретенной продукции и, в конечном счете, экономическая целесообразность ее применения. Проблему качественного результата следует рассматривать не только при изготовлении изделий и инструментов, но и в процессе их эксплуатации [9]. Высокая износостойкость, определяющая значительно большую длину пути резания при точении труднообрабатываемых материалов способствует тому, что суммарная технологическая себестоимость (C_m) использования наноструктурного твердого сплава «ВолКар» существенно ниже. Например, длина пути резания (L) при точении закаленной стали ХВГ (HRC₃ 55...58) на чистовых режимах резания ($V = 110$ м/мин, $S = 0,075$ мм/об, $t = 0,2$ мм) с критерием износа режущего инструмента $h_3 = 0,4$ мм составила: $L=1350$ м для наноструктурного твердого сплава «ВолКар», а для сплава VK6 – $L=1050$ м; суммарная технологическая себестоимость с учетом удельной себестоимости шлифования соответственно составляет: $C_m=47,21$ коп/мин – для твердого сплава «ВолКар» и $C_m=65,62$ коп/мин – для сплава VK6. Изложенный подход отвечает развивающимся в последнее время тенденциям, связанным с инжинирингом качества [10].

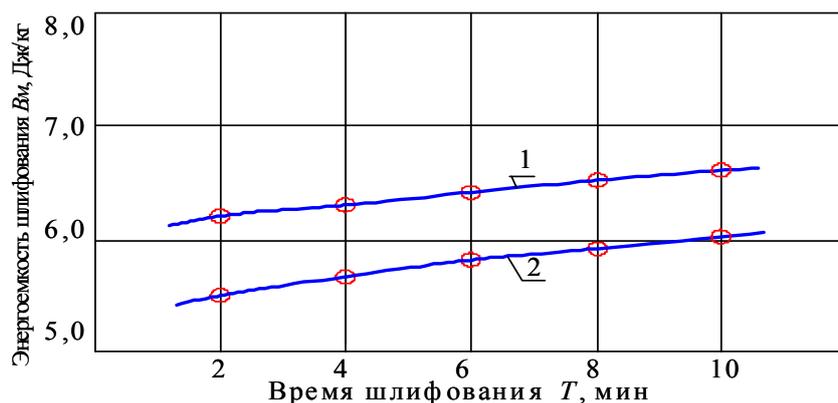


Рисунок 5 – Влияние времени на энергоемкость шлифования
 1 – «ВолКар», 2 – ВК6; $P_n=0,8$ МПа, $V=25$ м/с;
 круг 12A2-45° AC6 100/80 M1-01-4.

Заметим также, что шероховатость поверхности сплава «ВолКар» после шлифования меньше, чем традиционных твердых сплавов. Например, при шлифовании наноструктурного сплава «ВолКар» $R_a=0,32$ мкм ($P_n=0,8$ МПа, $V=25$ м/с; круг 12A2-45° AC6 100/80 M1-01-4), а – сплава ВК6 при таких же условиях $R_a=0,47$ мкм. Более высокая твердость рассматриваемого материала при его взаимодействии с режущей поверхностью алмазных кругов способствует образованию значительно большего количества субмикроромок на каждом зерне, чем при шлифовании других материалов; кроме того нанозернистая структура материала также способствует снижению шероховатости обработанной поверхности.

Таким образом, можно констатировать существенное преимущество нового наноструктурного твердого сплава «ВолКар» при его использовании в качестве режущих пластин по сравнению с традиционными твердыми сплавами.

Список литературы: 1.Боровский Г.В. Инструментальное производство в России. М.: «ВНИИинструмент», 2008. – 160 с.: ил. 2.United States Patent № 6,617,271 В1 МКИ С04 В35/36. Tungsten carbide cutting tool materials / Gevorkian E., Kramer M., Kodash V. – Заявл.08.09.2003;Опубл.17.03.2005 – 14р. 3.Геворкян Э.С., Тимофеева Л.А., Чижикала В.А., Кислый П.С. Горячее прессование нанопорошков монокарбида вольфрама при нагревании электрическим током // Наноструктурное материаловедение. – Киев, 2007. – № 1. – с. 103–108. 4.Лякишев Н. П. Нанокристаллические структуры – новое направление развития конструкционных материалов // Вестник Российской Академии наук. – 2003. – Т. 73. –№ 5. 5.Муцяно В. И., Островский В. И. Коэффициент шлифования как критерий оценки процесса // Тр. ВНИИАШ. – 1965. – № 1. – С. 64–67. 6.Зубарь В. П., Крюков В. К., Алмосов В. В. Исследование особенностей трения синтетических поликристаллических алмазов с конструкционными материалами // Резание и инструмент. – 1975. – Вып. 13. – С. 54–58. 7.Узунян М. Д., Краснощек Ю. С. Высокопроизводительное шлифование безвольфрамовых твердых сплавов. – М.: Машиностроение, 1988. – 83 с. 8.Маслов Е. Н. Теория шлифования материалов. – М.: Машиностроение, 1974. – 320 с. 9.Харрингтон Дж. Х. Управление качеством в американских корпорациях. М. Экономика. – 1990. – 271 с. 10.Современные концепции качества за рубежом. М.: Госстандарт РФ. – 1992. – 56 с.

В. А. ФЕДОРОВИЧ, д-р техн. наук, **Є. О. БАБЕНКО**,
И. Н. ПЫЖОВ, д-р техн. наук, **Д. О. ФЕДОРЕНКО**,
Д. В. РОМАШОВ, **А. М. МАЛИНЯК**, Харьков, Украина

РАЗРАБОТКА 3D-МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССА ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКИ ИНСТРУМЕНТОМ ИЗ СТМ

Досліджений процес різання лезовим інструментом із надтвердих матеріалів (НТМ) шляхом 3D моделювання напружено-деформованого стану (НДС) зони різання. Здійснена кількісна оцінка напруг, що виникають в системі «різець–металофаза–заготовка», залежно від вмісту, розмірів і фізико-механічних властивостей металевих включень. Встановлений вплив якісного і кількісного складу металофази в ріжучій кромці лезового інструменту із НТМ на її цілісність в процесі експлуатації, визначені найбільш раціональні властивості алмазного різця, які дозволяють значно підвищити його надійність.

Исследован процесс резания лезвийным инструментом из сверхтвердых материалов (СТМ) с использованием 3D моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) зоны резания. Проведена количественная оценка напряжений, возникающих в системе «резец–металлофаза–заготовка», в зависимости от содержания, размеров и физико-механических свойств металлических включений. Установлено влияние качественного и количественного состава металлофазы в режущей кромке лезвийного инструмента из СТМ на ее целостность в процессе эксплуатации, определены наиболее рациональные свойства алмазного резца, позволяющие значительно повысить его надежность.

The process of cutting with tools of super hard materials (SHM) with the use of 3D modeling of stress-strain state of cutting area have been researched. Quantitative estimation of the stresses arising in the «bloom–chisel–metaphase» system, depending on the content, size and physical-mechanical properties of metallic inclusions have been conducted. The influence of qualitative and quantitative composition of metaphase at the cutting edge of blade tools from SHM to its integrity during the exploitation, determinate the most rational properties of the diamond cutter to significantly increase its reliability.

1. Актуальность темы. Современное производство предъявляет к инструментам и инструментальным материалам высокие требования по обеспечению работоспособности в условиях больших скоростей резания и динамических нагрузок, интенсивного теплового и химического взаимодействия с обрабатываемыми материалами. Наиболее полно таким требованиям отвечают инструментальные сверхтвердые материалы, в.ч. алмазы, которые, сочетают высокую твердость и прочность. На современном этапе развития науки и техники поликристаллические сверхтвердые материалы не только продолжают играть важную роль, но и находят новые области применения [1, 2, 3].

В то же время широкое применение лезвийного инструмента из СТМ сдерживается относительно невысокой надежностью при его эксплуатации. Так по данным института сверхтвердых материалов надежность инструмента из СТМ не превышает 46÷50 % [4], что связано особенностями синтеза СТМ и с отсутствием научно обоснованных принципов, позволяющих осуществлять выбор рациональных режимов резания и заточки алмазного лезвийного инструмента.

Учитывая вышеизложенное, актуальным является определение технологических параметров обработки на всем жизненном цикле лезвийного инструмента из СТМ: от первоначального изготовления до повторной заточки с учетом факторов, негативно влияющих на надежность инструмента, производительность процесса резания, что и составляет предмет данных исследований.

2. Анализ последних исследований и публикаций. Разработке путей повышения надежности лезвийного инструмента из СТМ посвящены работы Л. Н. Девина, А. Г. Найденко, В. Н. Нечипоренко [5–7], в которых приведены результаты изучения влияния режимов резания на надежность процесса точения алмазными резцами при точении алюминиевых сплавов и доказана эффективность метода акустической эмиссии для оценки работоспособности резцов.

Вопросы 3D-моделирования процессов лезвийной обработки рассмотрены в работах [8–10], авторами которых выполнен сравнительный анализ особенностей процесса резания, обоснована необходимость создания обобщающей модели этого процесса, а также представлена методология прогнозирующего моделирования процессов стружкообразования при резании.

В то же время изучению влияния качественных и количественных характеристик резцов из СТМ на их надежность при эксплуатации посвящено ограниченное число работ, данные которых носят несистемный характер и зачастую противоречивы.

3. Цель и задачи исследований. Целью работы является повышение эффективности резания алмазным лезвийным инструментом за счет научно обоснованного выбора характеристик резцов из СТМ, а также оптимизации режимов резания и заточки инструмента, повышающих его надежность и долговечность при эксплуатации. При этом основной задачей исследований являлось определение влияния характеристик лезвийного инструмента из СТМ на НДС систем типа «резец–металлофаза–заготовка» на основе прогнозного 3D-моделирования их НДС при наличии и отсутствии ударных нагрузок.

4. Основные материалы исследования. Для достижения поставленной цели выполнены теоретико-экспериментальные исследования процесса лезвийной обработки инструментом из СТМ с использованием метода конечных элементов (МКЭ). Моделирование

процесса резания проводилось с применением программного пакета SOLIDWorks; была создана трехмерная модель резца из СТМ, которая представляет собой режущий клин призматической формы с размером поперечного сечения 100×100 мкм и углом в плане $\varphi = 45^\circ$; углы резания составляли $\alpha = 45^\circ$, $\gamma = 0^\circ$. Модель рассматривалась как упругое тело с включениями на режущей кромке двух металлофаз призматической формы, расположенных на расстоянии 30 мкм (рис.1а). Материал режущего клина – АСПК с пределом прочности на изгиб 4 ГПа. После импортирования созданной 3D модели в программу COSMOSWorks была сформирована сетка конечных элементов и произведено ее сгущение в области контакта режущей кромки и расположения включений металлофазы (рис. 1б).

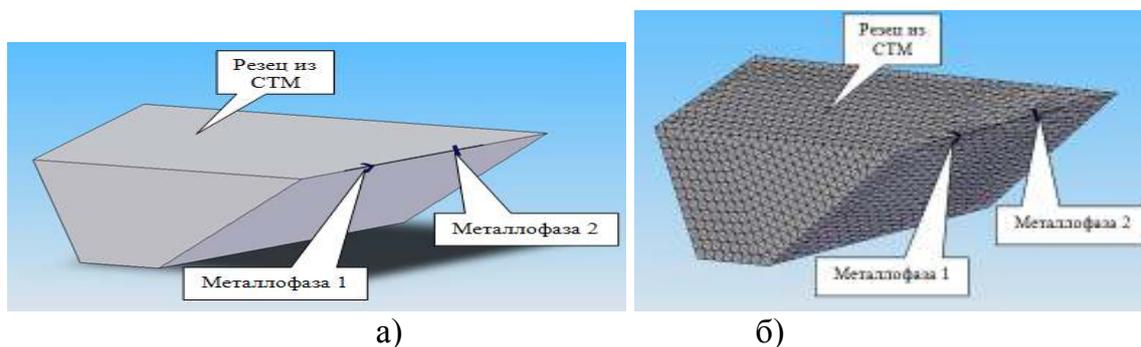


Рисунок 1 – Исходная 3D модель системы «резец-металлофаза» для расчета НДС в режущей кромке лезвийного инструмента из СТМ

В качестве металлофазы, преобладающей в синтетическом поликристаллическом алмазе (АСПК), были рассмотрены медь, никель, железо и молибден, физико-механические свойства которых представлены в табл.1.

Модель нагружалась нормальной силой к режущей кромке резца величиной 1 Н с одновременным приложением высоких температур в пределах $400 \div 800$ оС и ограничением степеней свободы режущего клина. В результате расчета 3D НДС системы «резец–металлофаза» были получены диаграммы, которые наглядно иллюстрируют поля их распределения (рис. 2).

Анализ результатов расчета свидетельствует о том, что при одинаковых температурных условиях в режущей кромке увеличение напряжений происходит в ряду металлофаз с преимущественным содержанием следующих материалов: железо < молибден < никель < медь.

Исследования влияния температурного фактора показали, что в отличие от традиционного мнения, где принято считать, что силовой фактор приводит к сколу режущей кромки, наши исследования показали, что температурный фактор также оказывает существенное влияние на разрушение режущей кромки лезвийного инструмента из СТМ в процессе его эксплуатации.

Комплексный анализ влияния свойств металлофазы кромки на 3D НДС изучаемой системы показал, что эквивалентные напряжения повышаются при увеличении коэффициента теплового расширения (КТР) и уменьшении показателей деформационных свойств металлофазы, таких как предел прочности при растяжении и предел текучести, характеризующие соответственно временное сопротивление разрушению и предельные напряжения деформации.

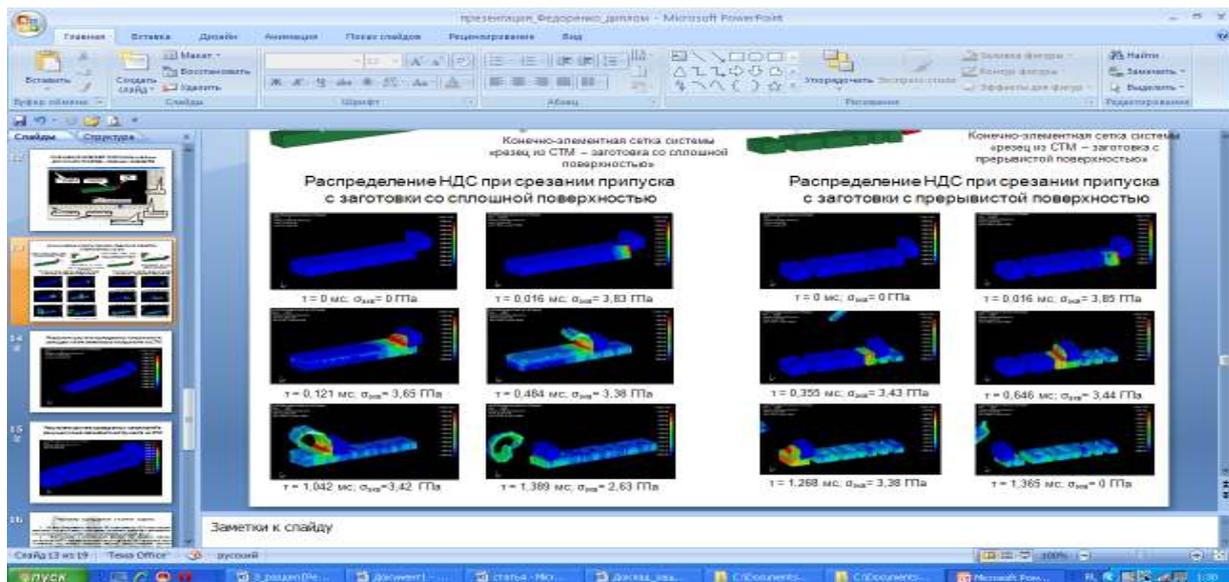
Таблица 1 – Физико-механические свойства металлов, преобладающих в составе металлофазы

Свойства	Преобладающий материал металлофазы			
	медь	никель	молибден	железо
Модуль упругости $E \cdot 10^{11}$, Па	1,1	2,1	3,2	1,2
Коэффициент Пуассона ν , м/м	0,37	0,31	0,38	0,31
Модуль сдвига $\mu \cdot 10^{10}$, Па	4,0	7,9	12,0	7,7
Плотность ρ , кг/м ³	8900	8500	10000	7900
Предел прочности при растяжении $\sigma_{раст} \cdot 10^8$, Па	3,94	3,17	5,0	8,62
Предел текучести $\sigma_T \cdot 10^8$, Па	2,59	0,59	3,25	5,51
Коэффициент теплового расширения $\alpha \cdot 10^{-5}$, 1/К	2,4	1,7	0,5	1,1
Теплопроводность λ , Вт/мК	388	91	150	62

Для определения зависимости НДС системы от величины и количества включений металлофазы, находящихся в режущей кромке лезвийного инструмента из СТМ дополнительно были созданы модели, отличающиеся количеством и размером включений. В результате моделирования процесса резания установлено, что с увеличением размеров включений металлофазы в два раза эквивалентные напряжения в режущей кромке увеличиваются от 3 до 5 %. При увеличении количества включений зафиксированы максимальные значения возникающих при резании напряжений, что объясняется наложением деформационных полей. Таким образом, сделан однозначный вывод о том, что при увеличении размеров и процентного содержания металлофазы в синтетических алмазах происходит незначительный рост эквивалентных напряжений в резце из СТМ, что может привести к разрушению его режущей кромки.

Поскольку максимальная степень разрушения лезвийной кромки инструмента из СТМ наблюдается при работе с ударными нагрузками, например при обработке заготовок с прерывистой поверхностью, были проведены сравнительные исследования процессов резания сплошных и прерывистых поверхностей заготовки.

Исследование процесса резания лезвийным инструментом из СТМ при обработке сплошных и прерывистых поверхностей заготовки впервые было реализовано при использовании трехмерного динамического моделирования с использованием программного пакета LS-Dyna. Исходные



а) б)
 Рисунок 4 – Эпюры распределения НДС при резании сплошной (а) и прерывистой поверхностей (б)

Такой подход позволил в динамике наблюдать напряженно-деформированное состояние зоны резания, а также рассмотреть поведение заготовки и лезвийного инструмента из СТМ на каждом этапе резания.

Анализ динамики изменения температуры в зоне резания, позволил сделать вывод о пропорциональности температуры и силы резания в режущем инструменте. Вероятно, этим и объяснимы циклические изменения температур в зоне резания, которые непосредственно влияют на рабочее состояние алмазного инструмента.

Программный пакет LS-Dyna позволяет также определить изменения составляющих силы резания в процессе обработки материала. Анализ распределения составляющих силы резания при лезвийной обработке заготовок со сплошной и прерывистой поверхностями отличается весьма существенно. В случае резания заготовки с прерывистой поверхностью наблюдаются скачки на графиках составляющих силы резания в местах многократного врезания и выхода лезвийного инструмента из СТМ.

Таким образом, динамическое моделирование резания, позволяет предвидеть динамику изменения напряжений в изучаемых 3D-моделях и проследить изменение напряжений при ударных нагрузках.

Выводы и перспективы развития. Динамическое моделирование процесса резания прерывистых поверхностей лезвийным инструментом из СТМ в отличие от статических экспериментов, позволяет проследить изменение напряжений в системе не только в квазистационарном состоянии, но и на момент врезания и выхода инструмента. Использование

полученных результатов будет способствовать повышению эффективности лезвийной обработки за счет повышения надежности работы лезвийного инструмента из СТМ. Дальнейшее изучение 3D НДС инструмента из СТМ в динамике позволит в будущем прогнозировать его поведение в процессе резания и оптимизировать свойства инструмента СТМ с целью увеличения его надежности.

Список использованных источников: 1. *Грабченко А.И.* Расширение технологических возможностей алмазного шлифования. – Харьков: Вища школа, 1985. – 184 с.; 2. *Антонюк В.С., Волкогон В.М.* и др. Высокоэффективная обработка деталей технологического оборудования инструментом из ПСТМ на основе плотных модификаций нитрида бора / Антонюк В.С., Волкогон В.М., Муковоз Ю.А., Ковалев В.Д. // Резание и инструмент в технологических системах. – Междунар. науч.-техн. сборник. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2008. – Вып.74. – с. 7–13; 3. [WALTER komplettiert Produktportfolio um PKD- und PCBN-Werkzeuge.](http://www.idr-online.com/german/pages/archive/2004_4/04_art/htm) http://www.idr-online.com/german/pages/archive/2004_4/04_art/htm; 4. Сверхтвердые материалы. Получение и применение: монография в 6-ти томах. Т.1 / Под общ. редакцией *Н.В. Новикова* – Киев: ИСМ им. В.Н. Бакуля, ИПЦ «АЛКОН» НАНУ, 2005. – 466 с.; 5. *Девин Л.Н., Стахнив Н.Е.* и др. Применение метода акустической эмиссии для оценки работоспособности резцов из АТП при точении алюминиевых сплавов / Л.Н.Девин, Н.Е. Стахнив, А.Г.Найденко // Резание и инструмент в технологических системах: междунар. науч.-техн. сб. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2002. – Вып. 62. – С.44–47; 6. *Девин Л.Н., Найденко А.Г.* и др. Влияние режимов резания на надежность процесса точения силуминов алмазно-твердосплавными резцами / *Л.Н. Девин, А.Г. Найденко, В.Н. Нечипоренко*// Резание и инструмент в технологических системах: междунар. науч.-техн. сб. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2006. – Вып. 70. – С.170–177; 7. *Найденко А.Г.* Визначення надійності різців в алмазних композиційних НТМ шляхом реєстрації та аналізу акустичної емісії / Автореф. дис. канд. техн. наук по спец. 05.03.01. – Київ, 2009. – 20 с.; 8. *Залого В.А., Криворучко Д.В.* Перспективы создания прогнозирующей модели процесса резания на основе базового процесса – тангенциального точения /*В.А. Залого, Д.В.Криворучко* // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції/ «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я». – Харків: Курсор, 2005. – С.101–108; 9. *Криворучко Д.В., Залого В.А.* и др. Моделирование процесса обработки материалов резанием / *Д.В.Криворучко, В.А. Залого, Н.П. Кутовой* // Оборудование и инструмент для профессионалов. – 2009. – № 6 (117). – С.20–23; 10. *Криворучко Д.В., Залого В.А.* и др. Основи 3D-моделювання процесів механічної обробки методом скінчених елементів: навчальний посібник / *Д.В.Криворучко, В.А. Залого, В.Г.Корбач.* – Суми: Вид-во СумДУ, 2010. – 208 с.

В. Г. ШКУРУПИЙ, канд. техн. наук, Харьков, Украина

ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЗМА ФОРМИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ОБРАБОТКЕ РЕЗАНИЕМ

Наведено результати досліджень механізму формування поверхневого шару при обробці різанням.

Приведены результаты исследований механизма формирования поверхностного слоя при обработке резанием.

Results of researches of the mechanism of formation of a superficial layer are resulted at processing by cutting.

Введение и постановка задачи. Изучению параметров качества поверхности после абразивной обработки в научно-технической литературе уделено большое внимание [1]. Однако, при оценке состояния поверхностного слоя деталей, подвергнутых финишной обработке, зачастую очень сложно оценить параметры шероховатости поверхности. В особой мере это относится к оценке высотных параметров шероховатости поверхности R_a и R_z , а также критерия шероховатости поверхности F , т.к. при использовании метода ощупывания, разрушения от иглы профилометра соизмеримы, а иногда и больше измеряемых неровностей на поверхности. Поэтому использование совместной оценки оптических свойств, работы выхода электронов и параметров шероховатости обработанной поверхности позволит глубже изучить механизм формирования поверхностного слоя при обработке резанием. Целью работы является изучение механизма формирования поверхностного слоя при обработке резанием.

Содержание работы. Исследования влияния критерия шероховатости на поглощательную способность поверхности стальных деталей после обработки резанием рассмотрены нами в работах [2, 3]. Исследования по технологическому обеспечению заданных оптических свойств поверхностей деталей из алюминиевых сплавов подробно рассмотрены в работе [4]. На рис.1 приведены зависимости между коэффициентом излучения, критерием шероховатости поверхности и

значениями контактной разности потенциалов (КРП) на поверхности деталей из алюминиевых сплавов после различных методов их обработки.

Как показали исследования геометрических характеристик поверхностей деталей щуповыми методами и растровой электронной микроскопии (рис. 2, рис. 3 и рис. 4) на предварительных стадиях обработка с применением фрезерования, точения с использованием традиционных инструментальных материалов (сталь Р18, твердый сплав и др.) гидроабразивной обработки и обработки металлической дробью, изменение оптических характеристик связано с изменением критерия шероховатости поверхности. Применение финишных методов обработки приводит к образованию поверхностей, величина критерия шероховатости которых приближается к 1 и изменения оптических характеристик связано с изменением КРП. Поверхности деталей машин, имеющие значение F , близкое к единице, следует отнести к высокоотражательным или поверхностям, имеющим низкую поглощательную способность. Исследования топологии поверхности деталей после обработки резанием позволили изучить характер ее изменения в зависимости от вида обработки. Максимальные значения были достигнуты на поверхности деталей после шлифования, гидроабразивной обработки и обработки металлической дробью.

На профиле шероховатости образуются субмикронеровности значительных размеров сравнимых по величине с длинами волн падающего излучения (максимальная величина 0,9 мкм). Топология поверхностей шлифованных деталей отличается от топологии поверхности полированных деталей. Исследование формирования геометрических характеристик на полированных поверхностях показало, что форма и размеры неровностей таких поверхностей отличаются от формы и размеров неровностей после шлифования, гидроабразивной обработки, обработки металлической дробью.

При полировании наряду с процессом резания происходит процесс пластического деформирования, который приводит к сглаживанию неровностей и перетеканию металла из выступов во впадины. Это изменяет форму и направления неровностей и позволяет уменьшить их размеры до предельных значений. Как показали электронно-микроскопические исследования на профиле шероховатости поверхности деталей после гидроабразивной обработки, обработки металлической дробью как и при шлифовании образуется субмикрощероховатость, размеры которой сравнимы с длинами волн падающего излучения.

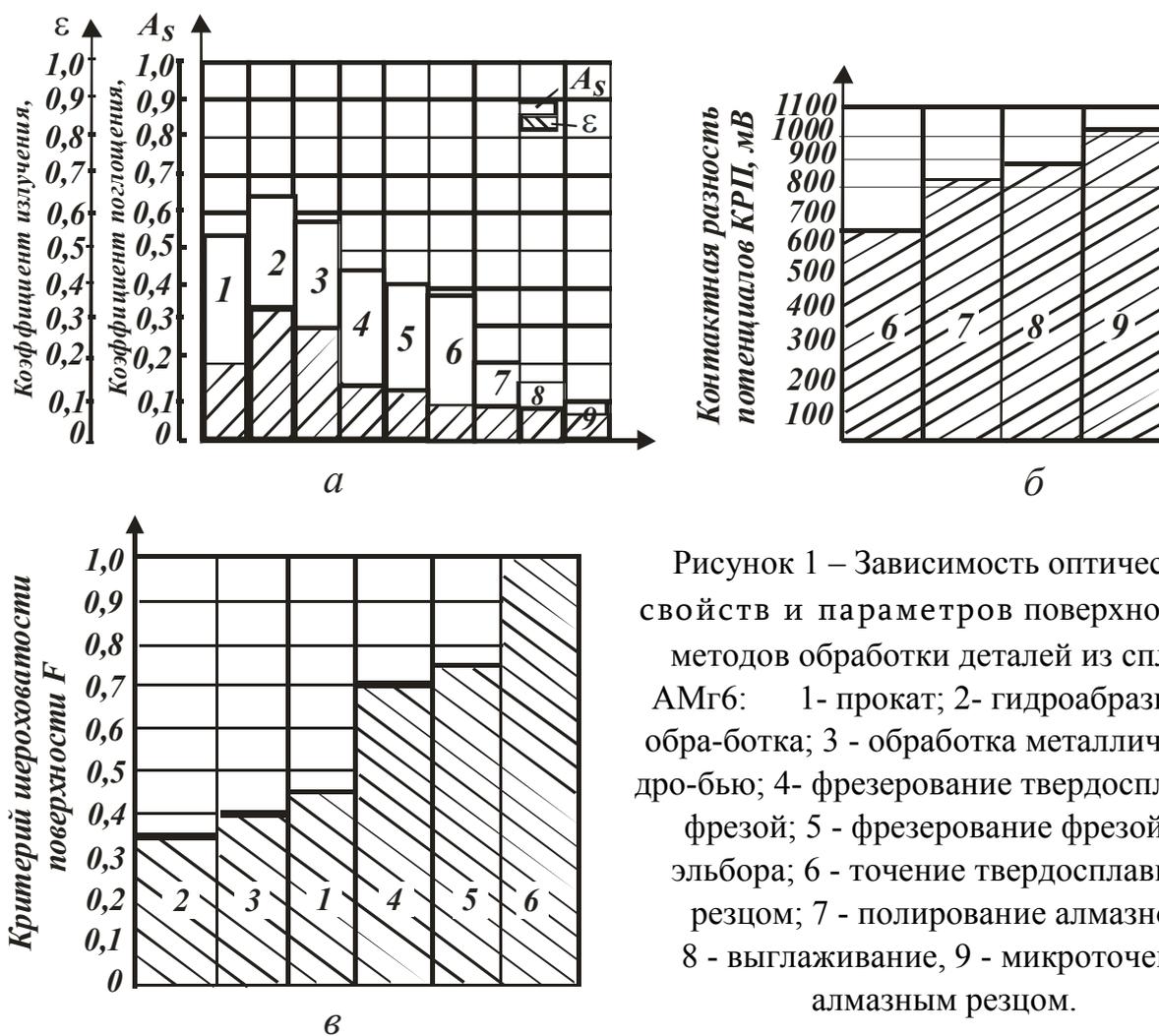


Рисунок 1 – Зависимость оптических свойств и параметров поверхности от методов обработки деталей из сплава АМг6: 1- прокат; 2- гидроабразивная обработка; 3 - обработка металлической дробью; 4- фрезерование твердосплавной фрезой; 5 - фрезерование фрезой из эльбора; 6 - точение твердосплавным резцом; 7 - полирование алмазное; 8 - выглаживание, 9 - микроточение алмазным резцом.

Так, на некоторых поверхностях образцов они достигали значений до 0,8-0,9 мкм. При гидроабразивной обработке, шлифовании, обработке металлической дробью формы и размеры выступов (впадин) профиля шероховатости различаются в зависимости от направления ощупывания. Порядок размеров неровностей имеет больший, чем при абразивном полировании, диапазон изменения. Количество неоднородностей геометрического характера соизмеримых с длинами волн падающего излучения, меньше при полировании, что можно объяснить снижением эффекта микрорезания, увеличением усилий резания. Изменение условий резания при лезвийной обработке, фрезеровании (по отношению к полированию) приводит к еще большему увеличению высоты неровностей (кроме алмазного точения). Однако форма и количество микронеровностей, соизмеримых с длинами волн падающего излучения, изменяется незначительно.

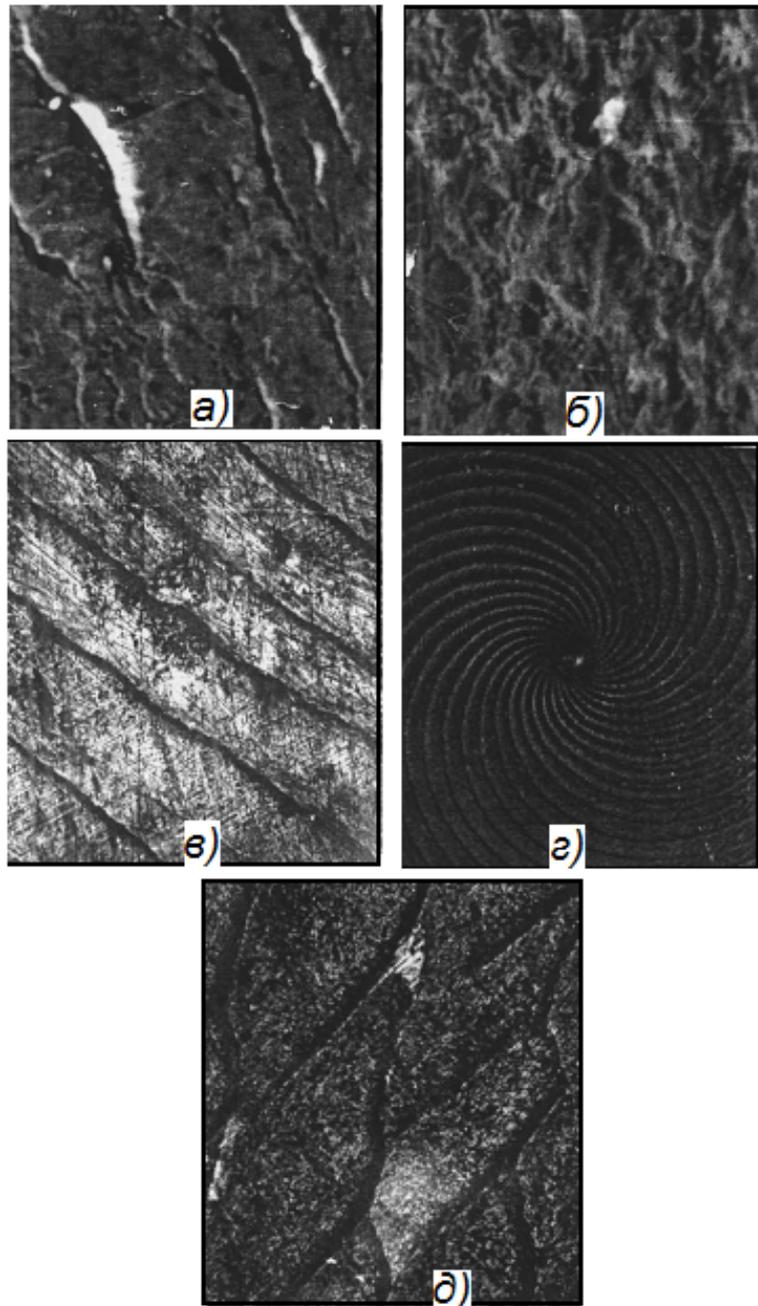


Рисунок 2 – Топология поверхности образцов из сплава АМг6 после различной обработки: а) – прокат; б) – обработка металлической дробью; в), г), д) – рельеф поверхности после поверхностного пластического деформирования (ППД); а), б) – электронные снимки (x770).

Сглаживание поверхностного слоя при абразивной обработке зависит от величины нормальной составляющей силы резания, что подтверждается схемами обработки, применяемыми при изучении изменения критерия шероховатости поверхности, отношения R_a / R_{max} , коэффициента поглощения и значений контактной разности потенциалов КРП. Величина критерия шероховатости на фрезерованных поверхностях имеет значения около 0,9.

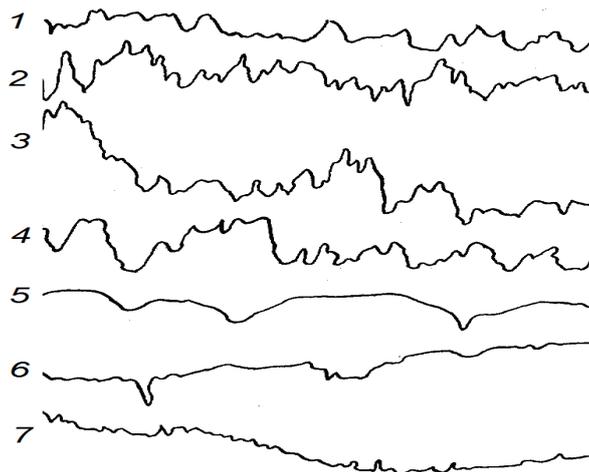


Рисунок 3 – Профилограммы поверхности образцов из сплава АМг6 при различных горизонтальном (ГУ) и вертикальном (ВУ) увеличениях:
 1-прокат (200 и 10000); 2-гидроабразивная обработка (200 и 4000);
 зуфрезерование (100 и 2000); 4- точение твердым сплавом (400 и 10000);
 5-абразивное полирование (200 и 10000); 6- выглаживание (200 и 10000);
 7-микроточение алмазом (200 и 100000).

Исследования геометрических характеристик поверхности после обработки ППД показали, что при малых усилиях вдавливания индентора происходит сглаживание микронеровностей исходной поверхности за счет деформации вершин выступов аналогично обкатыванию; с увеличением усилия образуется ровный микрорельеф со следами невыглаженных исходных микронеровностей на участках наиболее глубоких впадин. Дальнейшее увеличение усилия приводит к полному выглаживанию исходных микронеровностей и образованию полностью нового микрорельефа, высота, форма и расположение которого будут определяться критерием шероховатости, величина которого практически равна единице. Изменение структуры обработанной поверхности, а также появление в поверхностном слое сжимающих напряжений приводит к уменьшению количества неоднородностей поверхностного слоя и увеличению отражательной способности поверхности после ППД. При виброобкатывании, как установлено, можно получить различный характер микрорельефа поверхности деталей из алюминиевых сплавов, который практически не изменяет A_s и ε .

Рассмотрим вариант механизма образования поверхностей для изделий с высокой отражательной способностью.

Технологическое обеспечение поверхности лазерных зеркал с высокой отражательной способностью при длине волны 10,6 мкм, а также поверхностей деталей летательных аппаратов при длине волн падающего на поверхность излучения от 0,2 до 2,5 мкм связано с обеспечением на них максимальных значений КРП, т.е. создания поверхностей с необходимыми физико-химическими параметрами. Как видно из результатов

исследований (рис. 1), максимальных значений контактная разность потенциалов может быть достигнута абразивной обработкой (полирование, доводка), лезвийной обработкой (точение с применением сверхтвердых материалов, в том числе природных алмазов), поверхностным пластическим деформированием.

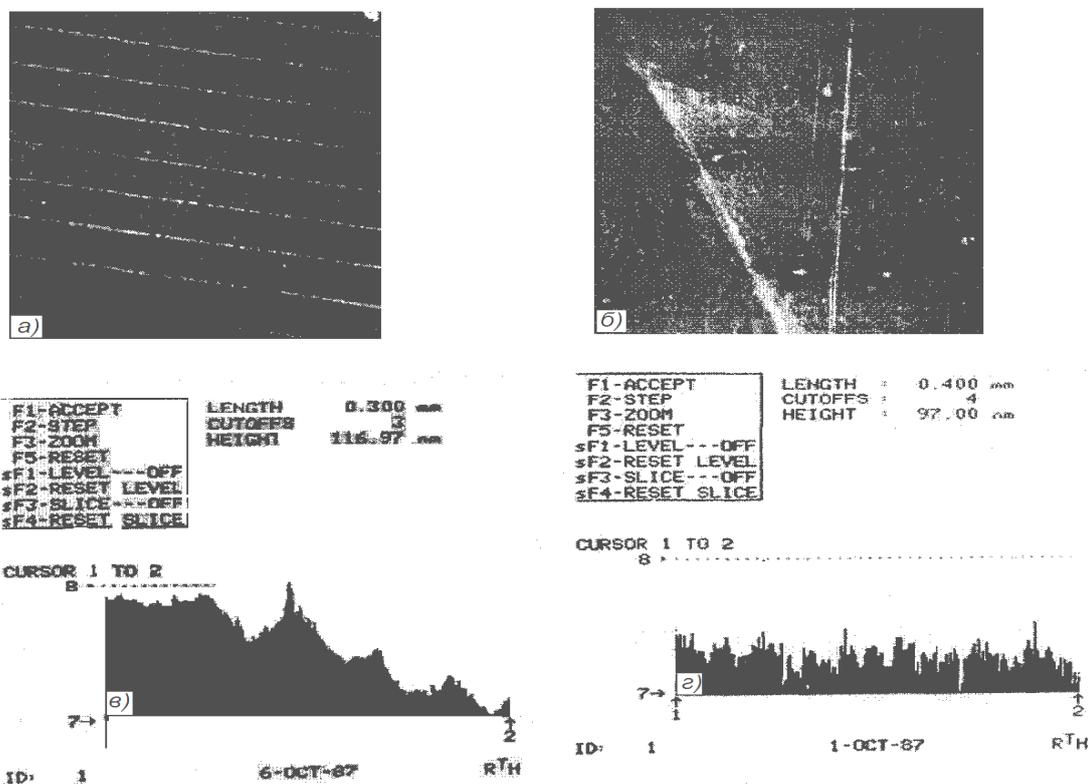


Рисунок 4 – Топология поверхности образцов из сплава АМг6 после алмазного микроточения (а, в) и абразивного полирования (б, г): (а и б) – электронные снимки при увеличении (x1250); (в и г) – профилограммы.

Для обеспечения высокой отражательной способности (кроме механической обработки) можно использовать электрохимическое или химическое полирование, которые в силу специфики процесса создают металлические поверхности с благоприятной тонкой структурой, которая обеспечивает максимальные значения КРП.

В настоящее время для получения высокой отражательной способности лазерных зеркал из различных материалов (медь, алюминий и его сплавы, молибден и др.) применяются традиционные методы обработки резанием: лезвийная обработка – точение резцами из природных алмазов и обработка свободными абразивом – полирование (доводка) с применением смоляных полировальников и технологических сред, содержащих алмазные микропорошки. Нами изучен механизм образования поверхности с высокой отражательной способностью обработкой резанием на зеркалах из меди и алюминиевых сплавов. Было исследовано изменение параметров и оптических

характеристик поверхностей после точения природным алмазом и алмазного полирования, которые имели максимальные значения критерия шероховатости поверхности. После алмазного точения зеркал из алюминиевого сплава АМгб отражательная способность ($\lambda = 10,6$ мкм) имела значения 96,6%, а после алмазного полирования – 92,6%. При этом значение коэффициента поглощения составляло 0,1 и 0,2 соответственно. Повышение отражательной способности поверхностей, обработанных точением алмазным инструментом, способствует благоприятное сочетание физико-химических свойств природного алмаза и обрабатываемых поверхностей, снижение интенсивности воздействия химически активных веществ, что приводит к уменьшению различного рода неоднородностей в двойном электрическом слое поверхности и уменьшает величину работы выхода электронов. На поверхности алюминиевого образца величина КРП составляет 1050–1100 мВ, а после полирования с применением алмазных микропорошков - около 880 – 900 мВ.

При абразивном полировании обрабатываемая поверхность адсорбирует химически активные вещества, содержащиеся в технологических средах, и кислород воздуха, что оказывает влияние на развитие химико-механических явлений, сопровождающих пластическое деформирование микровыступов поверхности. Процесс адсорбции интенсифицируется при механическом снятии пленок окислов с поверхности, что обеспечивается относительным изменением контакта полировальника и обрабатываемой поверхности.

При изучении топологии поверхностей образцов из сплава АМгб после точения алмазным инструментом и абразивного полирования обнаружены значительные различия (рис. 4). На полированных поверхностях, кроме следов абразивных зерен, имеется большое количество мелких точек «ряби», которые отсутствуют на поверхности, обработанной точением. Наличие "ряби", видимо, является результатом взаимодействия органических компонентов полирующих составов, абразивных зерен и обрабатываемой поверхности. На поверхности, обработанной точением могут наблюдаться следы резца глубиной 0,1-0,2 мкм и шириной 60 мкм, склоны гладкие, почти отсутствуют неровности, соизмеримые с длинами волн падающего излучения.

Значительные различия состояния поверхностей после точения и полирования подтверждаются и рентгенографическими исследованиями. После абразивного полирования поверхность деформирована в меньшей степени, чем после алмазного точения. Однако химическая активность алюминия на воздухе и шаржирование поверхности абразивом образуют субструктуру в виде конгломерата окислов металла, осколков абразивных зерен, соединений щелочных металлов. После алмазного точения поверхность деформирована в большей степени, химический состав ее также неоднороден. Однако в виду отсутствия шаржирования поверхности, а также меньшей степени ее окисления субструктура

поверхности имеет меньше дефектов и нарушения в двойном электрическом слое минимальны, работа выхода электрона минимальна.

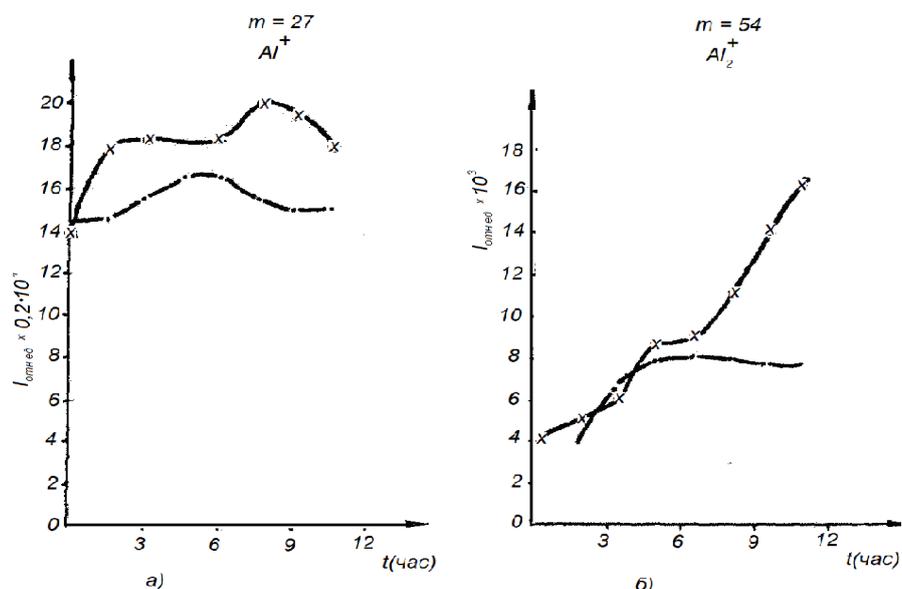


Рисунок 5 – Зависимость тока вторичных ионов Al^+ (а), Al_2^+ (б) от времени бомбардировки поверхности после различных видов обработки:

механическое
 полирование
 алмазное точение

Для определения гетерогенных веществ и других примесей, не относящихся к основному материалу, а образующихся в процессе обработки, поверхности исследовали методами масс- и оже-спектроскопией (рис. 5).

Выводы. На светоотражательную способность поверхностей оказывает влияние микрорельеф, формирующий шероховатость поверхности со значением критерия $F < 1$, а для поверхностей со значением F , равным или близким к единице, необходимо контролировать параметры физико-химического состояния, например, оценкой работы выхода электронов, т.е. оценкой контактной разности потенциалов. Сглаживание неровностей на поверхности можно контролировать отношением R_a / R_{max} .

Список литературы: 1. Качество поверхности при алмазно-абразивной обработке / Э.В. Рыжов, А.А. Сагарда, В.Б. Ильицкий, И. Х. Чеповецкий. – Киев: Наук. думка, 1979. – 244 с. 2. Шкуруний В. Г., Дудко П. Д., Назаров Ю. Ф. Эффективность применения финишных методов обработки материалов. – Киев: ДНТП, 1979. – 24с. 3. Шкуруний В.Г., Назаров Ю.Ф., Колоскова Е. К. Эксплуатационные свойства деталей после абразивной обработки // Пути повышения производительности, качества и эффективности процессов абразивной эльборовой обработки: Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции. – М., 1976. – С. 63-66. 4. Обработка деталей с высокой отражательной способностью с применением сверхтвердых материалов / Дудко П.Д., Назаров Ю.Ф., Коваленко В.С. и др. // Сверхтвердые материалы: Тезисы докладов Международного семинара. – Киев: АН УССР, 1981. – С. 21-22.

Ф.Я. ЯКУБОВ, д-р техн. наук, Симферополь, Украина

СИНЕРГЕТИКА И ПРОЦЕССЫ САМООРГАНИЗАЦИИ ПРИ ТРЕНИИ И ИЗНАШИВАНИИ

Розглянуто структурно-енергетичні аспекти процесів тертя, зміцнення й зносу, що протікають взаємообумовлено за законами синергетики в режимі самоорганізації.

Рассмотрены структурно-энергетические аспекты процессов трения, упрочнения и изнашивания, протекающие взаимообусловленно по законам синергетики в режиме самоорганизации.

The article deals with the structure and energy aspects of friction. Strengthening and deterioration processes that are interrelated and are conducted in accordance with the synergy law in way of self-organization.

Динамические процессы, сопутствующие резанию, протекают в неравновесных условиях и развиваются по законам синергетики. С этих же позиций необходимо рассматривать процессы упрочнения, трения и изнашивания режущего инструмента. Единство этих процессов со структурно-энергетической точки зрения проявляется в адаптации инструментального материала к энергетическому по природе упрочняющему или разрушающему воздействию, объединяемых единым понятием – структурная приспособляемость или самоорганизация.

Самоорганизация является фундаментальным явлением природы. Первоначально процессы самоорганизации относили исключительно к биологическим системам, но по мере накопления знаний область их проявления была рассмотрена и применительно к неживой природе. Суть этого явления заключается в том, что под действием внешнего возмущения любая термодинамически открытая нелинейная система перестраивается таким образом, что ее ответная реакция максимально компенсирует вызвавшую такое внутреннее изменение причину. В живой природе процессы самоорганизации проявляются в приспособлении и эволюции биологических объектов к меняющимся внешним условиям. В технике и технологии процессы самоорганизации наиболее ярко проявляются при трении, в частности, при формировании вторичных контактных структур и изнашивании [1-7].

Процессы трения и изнашивания реализуются на фоне повышенных градиентных соотношений температуры, напряжений, концентрации легирующих элементов и дефектов кристаллического строения и представляют сложную совокупность физико-химических явлений. Трение и изнашивание, без сомнения, можно отнести к неравновесным

термодинамическим процессам, поэтому самоорганизующиеся реакции, протекающие в них, неизбежны и обязательны.

Внутренним проявлением самоорганизации при трении являются следующие процессы:

- формирование вторичных структур с иной, в пределе более высокой прочностью и износостойкостью, по сравнению с исходной;
- развитие равновесной шероховатости независимо от исходной микрогеометрии поверхностей трения;
- повышение фактической площади контакта за счет прирабочного износа и, как следствие этого, снижение контактных нагрузок; реализация эффекта избирательного переноса и т. п.

Внешним проявлением самоорганизации является снижение и стабилизация практически всех энергетических, силовых и триботехнических параметров процесса трения и изнашивания, в частности коэффициента трения, температуры, интенсивности изнашивания и т. п.

Общие закономерности самоорганизации удобно анализировать с позиций системного подхода, суть которого заключается в следующем [8, 9].

Под триботехнической системой понимают совокупность твердотельных и жидкофазных объектов, взаимодействующих между собой контактно-механическим способом, при этом в зонах контакта осуществляется взаимный энергомассоперенос. Образующаяся при разрыве линейных скоростей взаимодействующих тел трибосистема называется внешней, а при наличии плавного градиента линейных скоростей — внутренней. Элементарные трибосистемы состоят из двух объектов. К ним можно отнести узлы трения качения и скольжения, работающие без смазки; взаимодействие поверхности с сухой абразивной массой; взаимодействие инструмента с обрабатываемым материалом при резании всухую и т. п. Сложные трибосистемы дополняются активной внешней средой, смазочно-охлаждающими веществами и искусственно вводимыми источниками энергий.

Любая система разбивается на подсистемы более высокого порядка. Так, триботехническую систему можно разбить на подсистемы контактного взаимодействия, объединенные по режимным, структурным, геометрическим и другим признакам родства. Они, в свою очередь, состоят из подсистем еще более высокого порядка, в рамках которых реализуются микроструктурные процессы, включая массоперенос.

Функционирование подсистемы любого уровня (порядка) можно описать уравнениями энергодбаланса и кинетики, отображающими взаимодействие входящих в данную подсистему компонентов и их внутреннее структурно-энергетическое состояние. В результате взаимодействия компонентов подсистемы часть энергии затрачивается на изменение характера их поведения, а другая часть — на изменение их внутреннего состояния.

Последняя представляет энергию, потерянную для изменения кинетики взаимодействия компонентов подсистемы между собой, но она является основной составляющей энергобаланса подсистемы следующего более высокого уровня (порядка). Подсистемы каждого уровня характеризуются своими наиболее информативными энергетическими параметрами в абсолютных, удельных, градиентных и других соотношениях, используемых для описания энергетических балансных и кинетических уравнений, отображающих первое и второе начала термодинамики. Объединение энергетических соотношений, отображающих функционирование подсистем разных уровней, допустимо, но не целесообразно из-за наличия в одном уравнении величин разных порядков, поэтому каждую подсистему независимо от ее уровня необходимо описывать своим термодинамическим уравнением. Подсистемы низкого уровня описываются уравнениями энергобаланса в абсолютных величинах или их потоках, подсистемы высоких уровней — плотностями энергетических потоков, а подсистемы более высоких порядков — удельными энергетическими параметрами или их градиентными выражениями.

Рассматривая процессы трения и изнашивания, к подсистеме первого уровня отнесем взаимодействие сопряженных деталей как материальных объектов с четкими геометрическими границами, однородными физико-механическими свойствами, с известными законами внешнего нагружения и движения каждой точки и, следовательно, заданным разрывом линейных скоростей в трибосистеме. Отдельное триботехническое сопряжение представляет индивидуальную подсистему первого порядка.

К подсистемам второго уровня (порядка) можно отнести зоны фрикционных взаимодействий на реальных участках контакта. Число подсистем второго уровня соответствует количеству пятен фактического контакта. Геометрические границы взаимодействующих объектов данных подсистем определяются зоной, охваченной структурно-энергетическими изменениями. В большинстве случаев предельные положения границ можно ограничивать глубиной пластических деформаций, численные размеры которых с достаточной степенью точности определяются экспериментально-теоретическими методами, например, по глубине изменения микротвердости, эпюре остаточных напряжений и т. п.

К подсистеме третьего уровня отнесем микрообъем контактной и приконтактной зоны, охваченной структурно-энергетическими изменениями трибопроцесса. В отличие от подсистем первого и второго уровня, предусматривающих взаимодействие как минимум двух твердофазных

объектов, компонентом подсистемы третьего порядка является одно твердофазное образование, эволюция структуры которого происходит за счет пронизывающих его потоков энергии и вещества. Численность подсистем третьего уровня может быть бесконечно большой, поэтому для анализа процесса необходимо выделять наиболее типичные варианты. В большинстве случаев достаточно рассмотрения структурных изменений на поверхности контакта и в близлежащих приконтактных зонах.

Эволюция самоорганизующихся систем представляет кинетический процесс, заканчивающийся либо ее полной деградацией (разрушением), либо выходом на принципиально отличное от исходного состояния положение устойчивого или неустойчивого динамического равновесия [8,9,10]. Направление течения процесса самоорганизации определяется критерием Пригожина-Гленсдорфа, который представляется в виде:

$$\frac{\partial P}{\partial t} \leq 0 \quad (1)$$

где P — производство энтропии, t — время процесса.

Согласно этому критерию в любой неравновесной системе самопроизвольные процессы идут так, что скорость изменения производства энтропии, обусловленная изменением термодинамических сил, уменьшается. Стационарные, или устойчивые, термодинамические процессы характеризуются минимальным производством энтропии. В случае открытости термодинамической системы возможно производство негэнтропии за счет обмена с внешней средой энергией и массой. Таким образом, критерий Пригожина-Гленсдорфа отражает естественное стремление любого кинетического процесса идти по пути наименьших энергетических потерь и он приложим к эволюционному анализу любой трибосистемы независимо от порядка уровня.

Применительно к процессу трения устойчивые, или стационарные, состояния в подсистеме первого уровня проявляются в стабилизации силовых и температурных параметров при выходе в зону установившегося периода. В подсистемах второго уровня устойчивость связывается с формированием «равновесной» шероховатости трущихся тел, снижением силовых и тепловых удельных нагрузок за счет увеличения фактической площади контакта. В этих процессах особая роль отводится приработочному изнашиванию, приводящему к оптимизации микрорельефа контакта [2, 6, 14]. В подсистемах третьего уровня устойчивость проявляется в виде процесса формирования вторичных диссипативных структур Π

Уравнение энергетического баланса для подсистемы первого уровня представляется в абсолютных энергетических величинах или их потоках, а именно:

$$\left(\overline{F} \cdot \overline{V}_c\right) \cdot t = W + \Pi \quad (2.1)$$

или

$$\left(\overline{F} \cdot \overline{V}_c\right) \cdot t = Q + \Pi^* \quad (2.2)$$

где F — усилие контактного взаимодействия; V_c — скорость скольжения; W — количество тепла, выделившееся в процессе контактного взаимодействия; Π — механическая составляющая энергодолга трибосопряжения; Q — тепловой поток; Π^* — поток механической энергии. Последние слагаемые уравнений (2.1; 2.2) представляют энергетические затраты на поверхностные структурные изменения и их изнашивание. В абсолютном выражении они не превышают 1,5...3,0 % от работы трения и могут быть опущены, тогда уравнения (2.1; 2.2) примут вид:

$$\left(\overline{F} \cdot \overline{V}_c\right) \cdot t = W \quad (3.1)$$

$$\overline{F}_{mp} \cdot \overline{V}_c = Q \quad (3.2)$$

Полученные уравнения отражают баланс между работой трения и выделенным теплом (или процесс диссипации подводимой механической энергии) и используются при решении тепловых задач трибоники.

Согласно универсальному критерию эволюции Пригожина-Гленсдорфа в неравновесной системе с фиксированными граничными условиями процессы идут в направлении уменьшения скорости производства энтропии. Следовательно, развитие подсистемы первого порядка должно идти по пути выполнения условия:

$$\frac{\delta Q}{T} \rightarrow \min \quad (4.1)$$

или

$$\frac{\delta F \cdot V}{T} + \frac{\delta V \cdot F}{T} \rightarrow \min \quad (4.2)$$

где T — средняя абсолютная температура процесса трения.

На рисунке 1 представлены обобщенные кинетические зависимости силовых и тепловых параметров трения [4, 13, 14,]. Приращение производства энтропии δP определяет режим функционирования трибосистемы. Прирабочный период характеризуется снижением δP , установившийся — стабилизацией, а катастрофическое изнашивание — резким возрастанием.

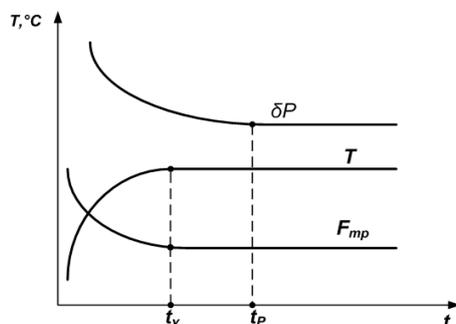


Рисунок 1 – Обобщенные кинетические зависимости силовых и тепловых параметров трения: T – температура; F_{mp} – сила трения; δP – приращение энтропии

Контактное взаимодействие при трении с энергетической точки зрения можно представить как совокупность процессов взаимодействия поверхности с потоком механической энергии, закон распределения которой на плоскости трения адекватен эпюрам касательных напряжений и относительных скоростей скольжения. В результате действия таких источников происходит изменение внутреннего структурно-энергетического состояния контактных слоев и микрогеометрии контакта, при этом большая часть потока механической энергии трансформируется в тепло. Недиссипативная составляющая механической энергии расходуется на формирование вторичных структур и совершение работы износа.

С энергетической точки зрения это проявляется в изменении химического потенциала вторичных структур и совершении работы диспергирования.

Термодинамика подсистем второго уровня рассматривает балансные соотношения, отображающие трансформацию недиссипативной части потока механической энергии, которые представляются в виде

$$\frac{\partial^2 \Pi_i}{\partial M \partial t} = \frac{\partial^2 U}{\partial M \partial t} + \frac{\partial^2 A_{узн}}{\partial M \partial t} + \frac{\partial^2 W}{\partial M \partial t} \quad (5)$$

где Π_i — внутренняя энергия; $A_{узн}$ — работа износа; M — масса взаимодействующих объектов контактного взаимодействия.

Процесс поглощения (или выделения) упругой внутренней энергии контактными слоями характеризуется высокой активностью в начальный момент фрикционного взаимодействия или в период приработки, а по завершению этого этапа его интенсивность падает до нуля. Всплески активности поглощения упругой энергии периодически происходят по мере раскрытия новых контактных слоев за счет изнашивания. Следовательно, в установившемся процессе трения энергетические затраты на формирование вторичных структур становятся величинами более низкого порядка по сравнению с остальными слагаемыми уравнения (5). Тогда уравнение энергетического баланса подсистемы второго уровня при установившемся процессе изнашивания примет вид:

$$\frac{\partial^2 \Pi_i}{\partial M \partial t} = \frac{\partial^2 A_{\text{изн}}}{\partial M \partial t} + \frac{\partial^2 W}{\partial M \partial t} \quad (6)$$

Внешним проявлением самоорганизации в подсистемах второго уровня является стабилизация интенсивности изнашивания (рис. 2), которая устанавливается в последнюю очередь после полной стабилизации всех силовых, тепловых и микрогеометрических параметров трибосоприжения. Появление любого возмущающего фактора в трибосистеме приводит к дестабилизации интенсивности изнашивания.

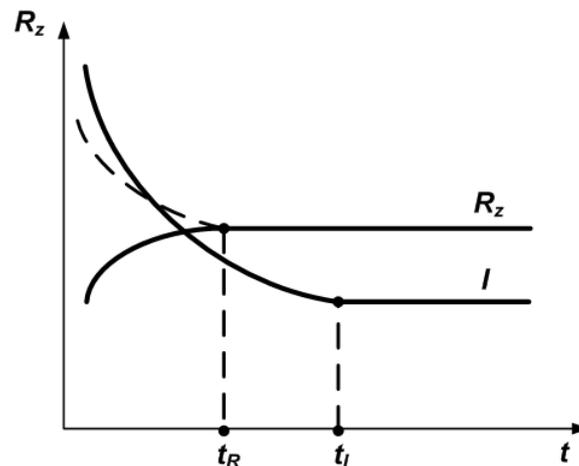


Рисунок 2 – Обобщенные кинетические зависимости шероховатости (R_z) интенсивности изнашивания (I) поверхности трения

Выше отмечалось, что в отличие от подсистем первого и второго уровней подсистема третьего порядка состоит из одного твердофазного объекта, пронизываемого потоками энергии и вещества, под действием которых реализуются процессы микроструктурных преобразований и формируются частицы разрушения. Единичная подсистема третьего уровня по сути представляет элементарный микрообъем, выделенный в

интересующей области контактной или приконтактной зоны, для которой потеря внутренней энергии за счет уноса частицы износа составляет величину одного порядка с самой ее внутренней энергией. С практической точки зрения наибольший интерес представляют структурные изменения, происходящие в плоскости трения, поэтому все особенности функционирования подсистемы третьего уровня рассмотрим для этого случая.

Термодинамика подсистемы третьего уровня отражает процесс трансформации нетепловой составляющей внешнего потока механической энергии в необратимые энергетические потери и внутренние структурно-энергетические преобразования, происходящие в контактных слоях при трении. В обобщенном варианте этот процесс можно представить следующей функциональной схемой.

Вся подводимая механическая энергия поглощается поверхностным слоем трущегося тела в виде упругой энергии деформации. В результате контактные структуры переходят в неравновесное состояние. Параллельно с этапом поглощения упругой внутренней энергии начинается ее трансформация в другие энергетические формы (например: в акустическую, магнитную, электрическую, тепловую и т. п.). Все возможные энергетические формы можно разделить на два вида - обратимые и необратимые. Необратимые — это такие виды энергий, которые в своем развитии достигли такого состояния, при котором потенциально невозможна их дальнейшая трансформация в другие формы. Они не могут быть задействованы в процессах преобразования структур и безвозвратно покидают подсистему, рассеиваясь в окружающей среде. К таким видам в первую очередь можно отнести тепловую, акустическую и световую энергии. Необратимые энергетические формы являются доминирующими во всех триботехнических и деформационных процессах [2, 15, 16]. Обратимые — это такие энергетические формы, которые не достигли состояния полного вырождения и обладают потенциальными возможностями для преобразования в другие энергетические виды. Они контролируют процессы структурных преобразований и в своей дальнейшей эволюции приближаются к необратимым формам. Следовательно, большая часть обратимых энергетических форм находится в кинетическом состоянии как промежуточная стадия между подводимой механической энергией и ее вырожденными или необратимыми видами. Лишь незначительная доля обратимых энергетических форм может относительно долго находиться в устойчивом состоянии, и именно они определяют свойства вторичных, в том

числе диссипативных структур. Они же управляют процессами массопереноса внутри подсистемы третьего уровня.

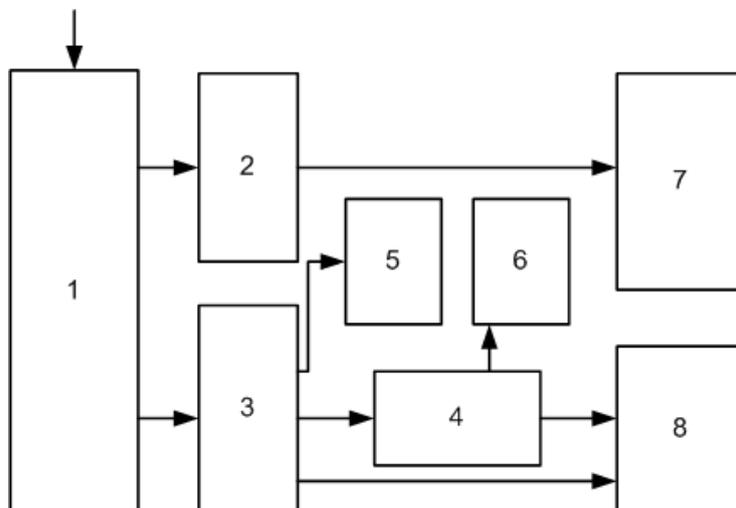


Рисунок 3 – Структурная схема трибосистемы третьего уровня: 1 — поглощенная упругая энергия деформации; 2—необратимые энергетические формы; 3—обратимые энергетические формы, 4 — внутренний микроструктурный массоперенос; 5 — энергетические затраты на разрушение (износ); 6 — продукты разрушения (износа); 7 — необратимые энергетические потери, 8 — вторичные диссипативные структуры

Энергомассоперенос в подсистеме третьего уровня инициируется градиентными соотношениями температур, напряжений, химического потенциала и т. п. Направление энергомассопереноса противоположно вектору градиента химического потенциала, поэтому по ходу развития Процесса происходит его снижение. Следовательно, энергомассоперенос, реализуемый в подсистеме третьего уровня, представляет одну из форм диссипации поглощенной механической энергии. Убыль массы за счет микроразрушения (износа) относится также к диссипативному явлению, так как внутренняя энергия, унесенная частицами износа, и энергетические затраты на совершение работы изнашивания необратимо покидают подсистему третьего уровня. Схематично процесс энергетических преобразований в подсистеме третьего уровня представлен на рисунке 3. Рассмотрим кинетику основных процессов.

Итак, основной формой диссипации поглощенной внутренней энергии является тепловыделение. При наличии «идеальной» диссипативной структуры будет иметь место полный баланс между поглощенной внутренней энергией и выделенным теплом. Процесс трансформации подводимой внешней энергии будет реализовываться по схеме «внешнее

энергетическое воздействие — необратимые энергетические формы — тепло». Такой термодинамический цикл относят к установившемуся режиму трения с минимальной интенсивностью изнашивания, энергетические затраты на который практически равны нулю. При нарушении баланса, когда внешнее энергетическое воздействие будет превышать производство тепла, часть поглощенной энергии начнет накапливаться в контактных слоях и трансформироваться в другие недиссипативные формы. Эта цепочка энергетических превращений будет совершаться до тех пор, пока поглощенная внутренняя энергия не выродится в диссипативный вид и восстановится баланс между подводимой энергией и выделенным теплом. Следовательно, подсистема третьего уровня функционирует только при возникновении дисбаланса между подводимой энергией и произведенным теплом, который появляется в момент внешних энергетических возмущений или при наличии энергетического воздействия кинетического характера. Трибосопряжение по существу представляет автоколебательную систему из-за дискретности пятен фактического контакта и особенностей деформационно-пластических процессов в контактных слоях, поэтому возмущения кинетического характера всегда сопровождают процессы трения и изнашивания. Энергетические процессы трибоконтакта представляют взаимодействие нестационарных энергетических потоков в начальный момент и квазистационарных — в установившийся период работы узла трения, поэтому теоретически подсистема третьего уровня функционирует постоянно, но с разной степенью активности.

Трансформация дисбалансной составляющей (или поглощенной упругой энергии деформации) в общем случае протекает по следующей схеме: «скрытая энергия деформации — внутренний микроструктурный энергоперенос — внешний массоперенос (изнашивание)». Напомним, что внутренний энергоперенос, происходящий в подсистеме третьего уровня, контролируется градиентными соотношениями температур, упругих напряжений, концентраций легирующих элементов и дефектов кристаллического строения, которые в совокупности определяют градиент концентрации внутренней энергии (градиент химического потенциала). Учитывая, что направление внутреннего микроструктурного энергопереноса противоположно вектору градиента химического потенциала и по мере реализации процесса приводит к его снижению, интенсивность самого энергопереноса со временем падает. Таким образом, внутренний микроструктурный

энергомассоперенос представляет одну из форм вырождения упругой энергии деформации или ее диссипацию.

Если подсистема третьего уровня не в состоянии перевести избыточную внутреннюю энергию в диссипативный вид с помощью внутреннего микроструктурного энергомассопереноса, то она избавляется от нее путем внешнего массопереноса или микроразрушения материала. Отсюда следует, что изнашивание представляет эффективный способ «сброса» избыточной внутренней энергии путем отторжения от подсистемы третьего уровня микрочастиц износа с избыточной концентрацией химического потенциала. Изнашивание является наиболее радикальным способом восстановления баланса между подводимой внешней энергией и ее диссипативными видами. При изнашивании диссипативный процесс включает убыль внутренней энергии частицами износа и энергетические затраты на совершение работы образования новых поверхностей (диспергирование). Изнашивание и сопутствующие ему процессы структурных превращений частиц износа представляют диссипацию упругой энергии деформации в необратимые для данной подсистемы формы, хотя по своей физической природе эти энергетические состояния еще имеют потенциальные возможности дальнейшей деградации до теплового уровня.

Уравнение, описывающее процесс диссипации внутренней энергии, представляется в виде:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = B^* \frac{\partial \mu}{\partial n} + a_u \frac{\partial M}{\partial t} \quad (7)$$

где μ — химический потенциал материала; n — перемещение в направлении максимального градиента химического потенциала; B^* — коэффициент энергомассопереноса (по аналогии с коэффициентом диффузии и коэффициентом теплопроводности); a_u — удельная работа изнашивания.

Выражение (7) с физической точки зрения представляет уравнение переноса, при этом первое слагаемое описывает процессы энергомассопереноса, реализуемые за счет градиентных соотношений, в частности диффузионный массоперенос и теплопроводность, а второе — конвективный массоперенос или поверхностное разрушение.

Уравнение (7) можно преобразовать:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{1}{a_u} \left(\frac{\partial U}{\partial t} - B^* \frac{\partial \mu}{\partial \eta} \right) \quad (8)$$

Из (8) следует, что изнашивание можно снизить как за счет уменьшения внешнего энергетического воздействия, так и интенсификации внутреннего энергопереноса.

Выводы. Трение, упрочнение и изнашивание относятся к неравновесным термодинамическим системам, протекают по законам синергетики и самоорганизующиеся процессы, как следствие их взаимообусловленности, неизбежны. Внешним проявлением самоорганизации является стабилизация всех энергетических, силовых и триботехнических параметров процесса трения и изнашивания при выходе в зону установившегося периода. Внутренним проявлением самоорганизации является развитие «равновесной» шероховатости трущихся тел, снижение силовых и тепловых удельных нагрузок за счет увеличения фактической площади контакта, формирование вторичных структур с иной, в пределе более высокой, прочностью, по сравнению с исходной.

Список использованных источников: 1. *Бершадский Л.И.* Основы теории структурной приспособляемости переходных состояний трибосистемы и ее приложение к задачам повышения надежности зубчатых и червячных передач: Дисс. на стиск. уч. ст.. д-ра. техн. наук. – Киев, 1982 2. *Карасик И.И.* Прирабатываемость материалов для подшипников скольжения. – М.: Наука, 1978. – 135 с. 3. *Ким В.А., Якубов Ф.Я.* Влияние структурной приспособляемости инструмента на его стойкость // Сб. трудов Уфимского авиационного института «Оптимизация процессов резания жаро- и особопрочных материалов». – Уфа, 1983. – С. 92–96. 4. *Костецкий Б.И.* Структурно-энергетическая приспособляемость материалов при трении // Трение и износ. – Минск, 1985. – Т. VI. – № 2. – С. 201–212. 5. *Пригожин И.* Введение в термодинамику необратимых процессов. – М.: Изд-во иностр. лит., 1960. – 128 с. 6. *Якубов Ф.Я.* Пути повышения стойкости металлорежущих инструментов на основе анализа термодинамики контактных процессов: Дисс. на стиск. уч. ст.. д-ра. техн. наук. – Ташкент–Тбилиси, 1984. – 400 с. 7. *Якубов Ф.Я., Ким В.А., Тимофеев С.М.* К термодинамике упрочнения и изнашивания режущего инструмента // Резание и инструмент в технологических системах. – Вып. 50. – Харьков: ХГПУ, 1996. – С. 211–216. 8. *Ханин М.В.* Механическое изнашивание материалов. – М.: Изд-во стандартов, 1984. – 152 с. 9. *Чихос Х.* Системный анализ в трибонике: пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – 352 с. 10. *Гленсдорф П., Пригожин И.* Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций. М.: Мир, 1973. – 280 с. 11. *Naken H.* Encyclopedia of Physics Laser Theory Spriger/ – Berlin; Heidelberg; New York, 1970. Vol. 25. – 440 p. 12. *Буше Н.А., Копытко В.В.* Совместимость трущихся поверхностей. – М.: Наука, 1981. – 128 с. 13. *Гаркунов Д.Н.* Триботехника. – М.: Машиностроение, 1973. – 496 с. 14. *Мур Д.* Основы трибоники: пер. с англ. – М.: Мир, 1978. – 488 с. 15. *Костецкий Б.И., Носовский И.Г., Караулов А.К., Костецкая Н.Б.* Поверхностная прочность материалов при трении. – Киев: Техника, 1976. – 292 с. 16. *Полухин П.И., Горелик С.С., Воронцов В.К.* Физические основы пластической деформации. – М.: Metallurgy, 1982. – 584 с.

ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 62-408.2

А. А. БЕРЕЗОВСКИЙ, А.Л. СТАНОВСКИЙ, д-р техн. наук,
В. М. ТОНКОНОГИЙ д-р техн. наук, Одесса, Україна

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ПОКРЫТИЙ НА ДЕТАЛЯХ МАШИН

Запропоновано стохастичну математичну модель процесу формування покриттів на деталях машин, яка містить прогнозуючий блок на нейронній мережі. Головною відмінною рисою запропонованої моделі є те, що до уваги приймаються практично всі параметри нанесення покриттів, що значною мірою впливають на пористість, від якої, в свою чергу, залежать майже усі фізико-механічні властивості покриттів.

Предложена стохастическая математическая модель процесса формирования покрытий на деталях машин, содержащая прогнозирующий блок на нейронной сети. Главной отличительной чертой предлагаемой модели является то, что во внимание принимаются практически все параметры нанесения покрытий, в значительной мере влияющие на пористость, от которой, в свою очередь, зависят почти все физико-механические свойства покрытий.

The stochastic mathematical model of a covering on machine details formation process which engages the forecast block on a neural network is offered. The main distinctive feature of offered model is that in attention almost all parameters of the coverings drawing are accepted, appreciably influencing porosity, from which almost all physic-mechanical properties of coverings, in turn, depend.

Покрyтия играют большую роль в современных технологиях упрочнения деталей машин. Качество этих покрытий зависит от многих факторов, но главными из них являются прочность и пористость. Обычно характер разрушения, например, напыленных газотермических покрытий при совместном деформировании с материалом основы зависит от соотношения адгезионной и когезионной прочности. Однако величины последних определяются, главным образом, пористостью и наличием окисленных зон в покрытии [1].

От пористости зависят почти все физико-механические свойства покрытий. Эта зависимость столь сильна, что часто пористость рассматривают в качестве параметра состояния в функциональной зависимости «численная характеристика свойства – пористость» [2]. Величины, определяющие проводимость (электро- и теплопроводность, магнитную и диэлектрическую проницаемости), упругость (нормальный и

сдвиговой модуль упругости), сопротивление пластической деформации (предел текучести, твердость), монотонно убывают с увеличением пористости и в общем виде могут описываться обобщенной степенной биномиальной функцией [3]

$$\beta = \beta_0 (1 - \Pi)^m, \quad (1)$$

где β – численная характеристика некоторого свойства пористого тела; β_0 – то же для материала, идентичного в структурном соотношении, но не содержащего пор; Π – пористость; m – показатель степени ($m > 1$).

Многообразие факторов, ответственных за формирование пористой структуры напыленных плазменных покрытий, обуславливает трудности постановки аналитических методов изучения пористости. Количество таких работ ограничено, и выполнены они при весьма вольных допущениях [4, 5]. Кроме того, в основном исследовалась зависимость пористости покрытия только от единичных параметров напыления.

В настоящей работе предложена следующая модель формирования плазменного покрытия на деталях машин. Ее основной задачей является определение пористости покрытия в зависимости от параметров процесса напыления.

Главной отличительной чертой предлагаемой модели является то, что во внимание принимаются практически все параметры напыления, в значительной мере влияющие на пористость. Это стало возможным, благодаря использованию нейронной сети в качестве «аппроксиматора» зависимостей пористости от отдельных параметров. При моделировании сделано допущение, что размер упрочняемой детали намного больше размера частицы напыляемого порошка.

На структурной схеме модели (рис. 1) первым блоком обработки входных данных является однородная трехслойная нейронная сеть с последовательными связями. Она обучается по результатам экспериментальных данных [2, 6] и аналитическим зависимостям пористости от отдельных параметров напыления [2, 6, 7].

На вход нейронной сети поступают значения технологических параметров напыления, требующие предварительной обработки перед подачей в блок стохастической обработки ($X_1 \dots X_{17}$): материал подложки, теплофизические свойства подложки, температура подогрева подложки, коэффициент сложности формы напыляемого изделия, состав напыляемого порошка, теплофизические свойства порошка, скорость частиц порошка, сила тока плазменной установки, напряжение плазменной установки, размер эффективного пятна термического воздействия на подложку, размер эффективного пятна напыления, температура газовой

струи, состав плазмообразующего газа, состав газовой среды напыления, дистанция напыления, расход распыляемого материала, место подачи материала в распылительную головку.

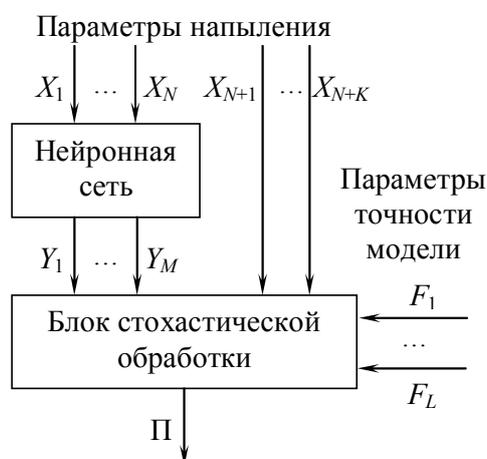


Рисунок 1 – Структурная схема модели напыления

Второй блок – блок стохастической обработки – моделирует послойное заполнение напыляемого покрытия отдельными частицами порошка. На каждом шаге моделирования добавляется некоторое количество частиц, располагаемых случайным образом на поверхности текущего фиксированного участка модели. Получено визуальное отображение модели в плоскости вертикального разреза покрытия (рис. 2).

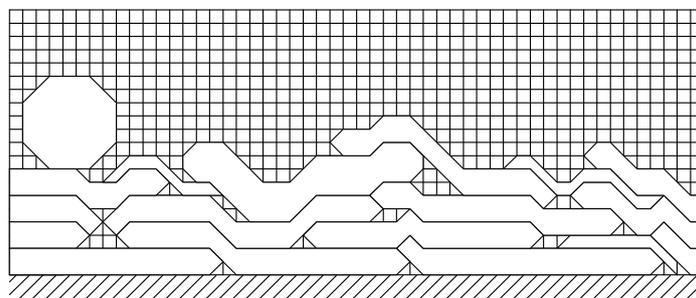


Рисунок 2 – Состояние стохастической модели после n -го шага нанесения покрытия

На входы $Y_1 \dots Y_7$ блока стохастической обработки поступают следующие выходы нейронной сети: коэффициент расплавленности частиц, коэффициент растекания (расплющивания) частиц, процент нерасплавленных частиц, среднее количество частиц, попадающих на поверхность за 1 с, скорость окисления подложки, скорость окисления материала порошка, средняя высота одного слоя.

Кроме того, на входы $X_{18} \dots X_{23}$ второго блока обработки подаются следующие параметры напыления: скорость перемещения газовой струи, средний размер частиц порошка, дисперсность частиц порошка, толщина

напыляемого покрытия, шероховатость поверхности подложки, время между нанесением слоев.

Для осуществления компьютерного моделирования двухмерное пространство разреза покрытия должно быть дискретным (рис. 2). Для этого его разбивали на квадратные ячейки. Поскольку все объекты модели (частицы порошка) имеют округлые формы, предложена дискретная сетка с тремя состояниями ячеек: пустая; наполовину заполненная; полностью заполненная.

Это позволяет, не уменьшая шаг дискретизации, резко увеличить точность модели.

При определении пористости покрытий учитывали степень окисления подложки и напыляемого порошка. Для этого после окончания моделирования напыления каждого слоя полученное значение пористости корректировали по ее зависимости от степени окисления материалов

$$\Pi_i' = \Pi_i t_{\text{сл}} v_{\text{оп}} / h_i, \quad (2)$$

где Π_i' – окончательная пористость i -го слоя; Π_i – пористость i -го слоя, полученная при моделировании; $t_{\text{сл}}$ – время между нанесением слоев; $v_{\text{оп}}$ – скорость окисления материала порошка; h_i – высота i -го слоя.

Точность стохастической модели управляется с помощью шага дискретизации пространства F_1 и шага дискретизации времени F_2 .

В практике газотермического напыления необходимые значения пористости подбираются экспериментально. Для этого затрачиваются большое количество материалов, энергии и времени.

Разработанная модель позволяет избежать этого. Она дает возможность быстро и удобно прогнозировать пористость плазменных покрытий для каждого конкретного случая. При этом точность прогноза достаточно высокая, что подтверждено опытами с молибденовыми покрытиями. Их пористость определяли методом гидростатического взвешивания и с помощью разработанной модели. Сравнение полученных значений дало отклонение в 10 – 12 %.

Список литературы: 1. *Онищенко А.Г.* Модель формирования покрытия при плазменном напылении порошковых материалов / *А.Г. Онищенко, А.Л. Становский.* – Материалы X семинара «Моделирование в прикладных научных исследованиях». – Одесса: ОНПУ, 2003. – С. 26 – 29. 2. *Петров С.В.* Плазменное газоздушное напыление / *С.В.Петров, И.Н. Карп* – К.: Наук. думка, 1993. – 494 с. 3. *Харламов Ю.А.* // Порошковая металлургия. – 1990. – № 12. – С. 36 – 41. 4. *Fukanuma H.* // Proc. Int. Thermal Spray Conf. (Orlando, Florida, 28 May – 5 June 1992). – P. 767 –772. 5. *Лазаренко Г.П.* Применение безразмерных комплексных параметров при анализе свойств плазменнонапыленного нихрома / *Г.П. Лазаренко, Л.И. Дехтярь, В.С. Лоскутов.* – Порошковая металлургия. – 1981. – № 2. – С. 41 – 44. 6. *Кудинов В.В.* Нанесение покрытий плазмой / *В.В. Кудинов, П.Ю. Пекшев, В.Е. Белащенко и др.* – М.: Наука, 1990. – 408 с. 7. *Тушинский Л.И.* Исследование структуры и физико-механических свойств покрытий / *Л.И. Тушинский, А.В. Плохов.* – Новосибирск: Наука, 1986. – 200 с.

А. И. ГРАБЧЕНКО, д-р техн. наук,
В. Л. ДОБРОСКОК, д-р техн. наук,
С. И. ЧЕРНЫШОВ, канд. техн. наук,
Я. Н. ГАРАЩЕНКО, канд. техн. наук, Харьков, Украина

СОВРЕМЕННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОБРАТНОГО ИНЖИНИРИНГА ПРОМЫШЛЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ

Розглянуто особливості технології зворотного інжинірингу промислових виробів. Представлено можливості існуючого устаткування для зворотного інжинірингу. Виконано аналіз програмного забезпечення для створення 3D моделей на основі системи обмірюваних точок.

Рассмотрены особенности технологии обратного инжиниринга промышленных изделий. Представлены возможности существующего оборудования для обратного инжиниринга. Выполнен анализ программного обеспечения для создания 3D моделей на основе системы измеренных точек.

Features of technology of reverse engineering of industrial products are considered. The existing equipment's capabilities for reverse engineering are presented. It is analysed the software for creation 3D models on a basis of a system of measured points.

Успешность реализации готовых изделий напрямую зависит от оригинальности дизайна и качества исполнения. Конкуренция во всех отраслях промышленности требует от современных компаний быстрой реакции на запросы потребителей и сокращения сроков подготовки производства новых изделий. Сократить время разработки трехмерных моделей для проектируемых изделий позволяет использование обратного инжиниринга (Reverse Engineering). В ряде случаев это единственная возможность описать изделие, на которое отсутствует конструкторская документация.

Обратный инжиниринг – интенсивно развивающаяся технология. Имея широкое практическое применение, обратный инжиниринг требует научного подхода к его изучению для решения целого ряда проблем: рационального обоснованного выбора метода обратного инжиниринга, оборудования и программного обеспечения с учетом особенностей промышленных изделий.

Поэтому вопросы выбора оборудования и программного обеспечения для решения задач обратного инжиниринга промышленных изделий являются актуальными.

Обратный инжиниринг (Reverse Engineering)

Целью обратного инжиниринга является получение математической модели на основе измерения реального объекта (рис. 1) [1].

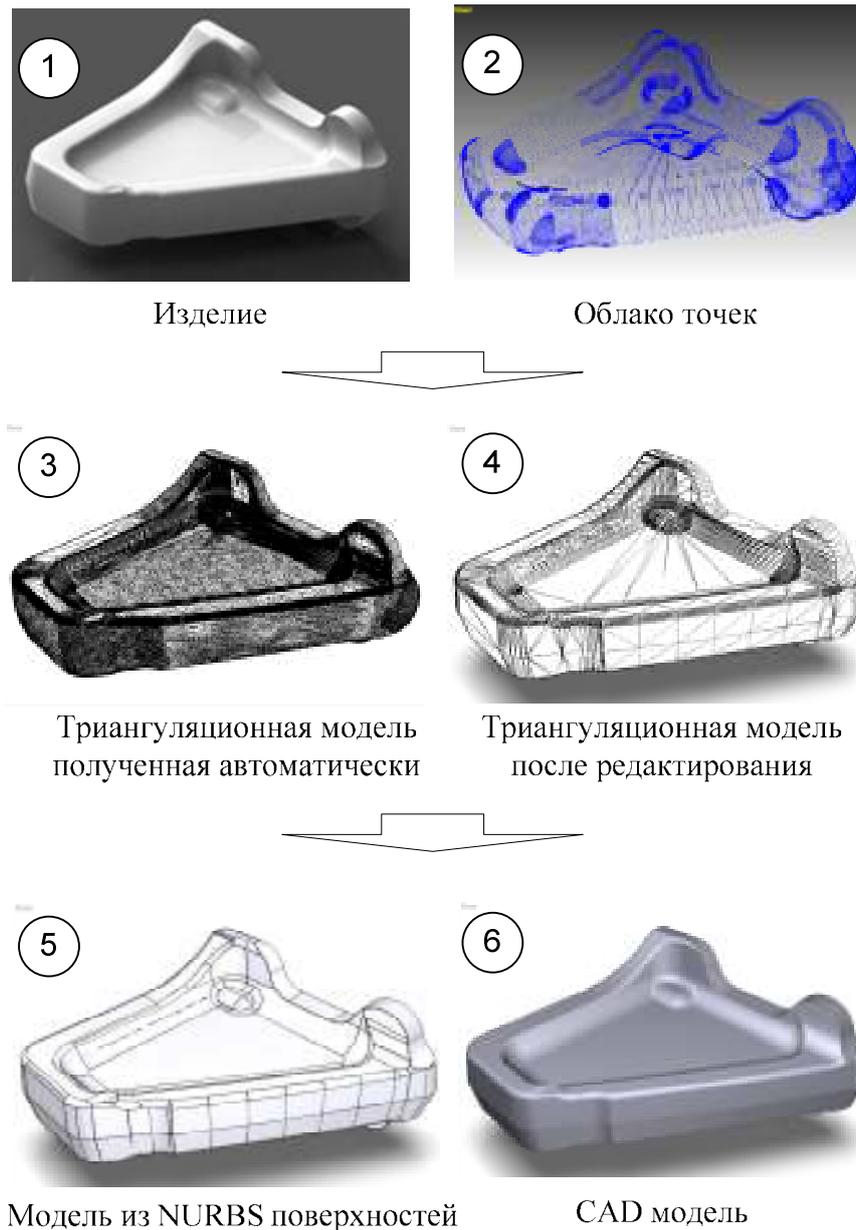


Рисунок 1 – Этапы обратного инжиниринга промышленного изделия

Технология обратного инжиниринга имеет следующие области применения:

- машиностроение (на этапе проектирования, для создания трехмерных моделей, мастер-моделей; в производстве, для контроля точности изделий, проведения измерений геометрических параметров инструмента и последующей коррекции инструмента; для создания модели изделия и проведения последующих аэродинамических испытаний; для хранения цифровых копий изделий, инструмента и оснастки для обеспечения возможности их изменения, ремонта или повторного воспроизведения);

- строительство и архитектура (для создания трехмерных моделей зданий, улиц, рельефа, монтажных работ, контроля состояния сооружений в период эксплуатации);

- горная промышленность (для 3D-моделирования открытых карьеров и подземных выработок, определения объемов выработок и складов, маркшейдерского сопровождения буровзрывных работ, строительства и проектирования объектов обустройства месторождений) [2];

- нефтегазовая промышленность (для 3D-моделирования месторождений, продуктопроводов, геометрического контроля резервуаров, проектирования объектов обустройства месторождений);

- энергетика (для сканирования кабелей, опорных конструкций, создания 3D-моделей монтажных работ, контроля состояния объекта);

- культура и искусство (для хранения цифровых копий скульптурных композиций и барельефов; создания сувениров; воспроизведения утраченных культурных ценностей, реставрационных работ);

- биометрия (для идентификации личности по трехмерной модели лица);

- компьютерные игры и создание спецэффектов;

- проектирование одежды и обуви [3];

- медицина (для протезирования, планирования операций, ортопедии, пластической хирургии, косметологии) [4, 5, 6] и т.д.

В общем случае, процесс обратного инжиниринга промышленных изделий включает следующие этапы: визуальный анализ конструкции изделия; сканирование; создание и редактирование триангуляционной модели (при использовании бесконтактных методов сканирования, основанных на технологиях структурированного белого света и лазерного луча); построение базовых поверхностей; контроль базовых поверхностей; построение 3D модели; контроль 3D модели и ее доработка (при необходимости).

Рассмотрим технологические возможности оборудования используемого для обратного инжиниринга, их характеристики и области применения. Это может служить основой для рационального выбора оборудования на этапе принятия решения об использовании метода получения модели изделия.

Оборудование Reverse Engineering

Оборудование обратного инжиниринга представляет собой установки для 3D сканирования (процесс определения координат точек, принадлежащих поверхностям проектируемых изделий с целью последующего получения их 3D моделей, которые могут модифицироваться в САД-системах) [5, 7, 4].

По методу сканирования различают контактные и бесконтактные 3D сканеры (рис. 2) [8].

Контактный метод сканирования. Контактный метод 3D сканирования построен по принципу обвода поверхности изделия специальным высокочувствительным щупом, с помощью которого в компьютер передаются координаты сканируемого объекта.

К преимуществам контактного метода можно отнести простоту сканирования призматических объектов, независимость качества измерений от освещенности, простоту использования и небольшой объем получаемых файлов, небольшую трудоемкость получения 3D модели.

К недостаткам относятся большое время сканирования (за одно перемещение измерительного инструмента определяются координаты только одной точки), невозможность сканирования криволинейных поверхностей и миниатюрных изделий [9].

Бесконтактный метод сканирования. При бесконтактном методе сканирующие устройства делятся на пассивные и активные 3D сканеры.

Активные 3D сканеры излучают на объект сканирования свет, луч лазера, ультразвук или рентгеновские лучи и считывают отражение. Активно ведутся разработки магнитных сканеров, использующих для определения координат поверхности объекта изменение его пространственного магнитного поля. Следует отметить, что ультразвуковые и магнитные сканеры крайне чувствительны к различным помехам. Так, первые могут реагировать на погодные явления, звуковые волны, создаваемые другим оборудованием, кондиционерами или даже флуоресцентными лампами, а источником помех для вторых могут быть металлические объекты и электропроводка в помещении [10].

Пассивные 3D сканеры основаны на принципе обнаружения отраженного окружающего излучения (без излучения сканера).

Также бесконтактные 3D сканеры можно разделить по принципу работы на четыре основные технологии сканирования:

- фотограмметрия;
- томография;
- структурированный белый свет;
- лазерный луч.

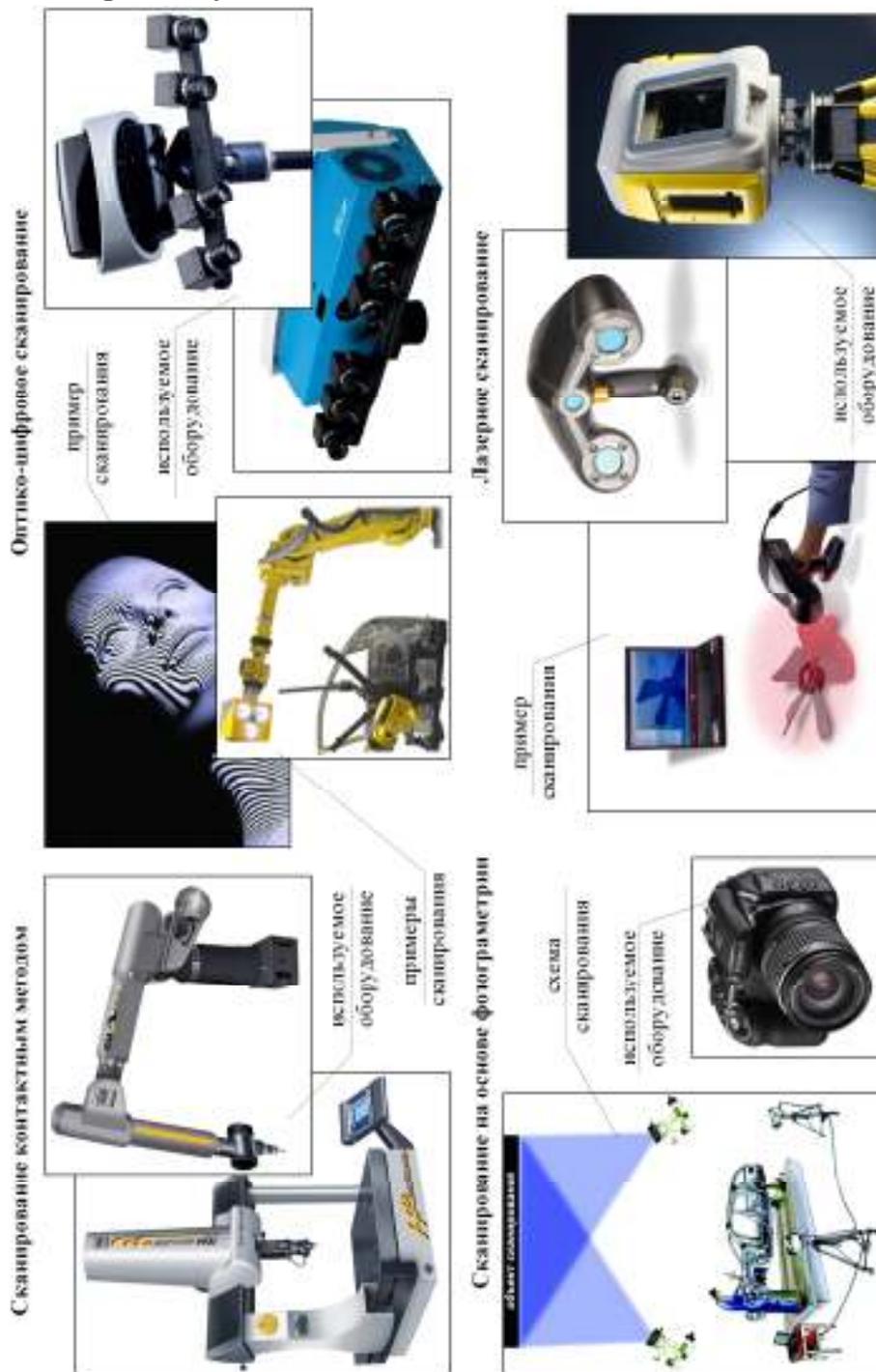


Рисунок 2 – 3D сканирующие устройства

Сканирование на основе фотограмметрии представляет собой фотографирование исходного объекта с различных ракурсов и воссоздание на основе полученных изображений трехмерной модели (рис. 2). Преимуществами данного метода являются низкие затраты на оборудование и отсутствие контакта с измеряемой поверхностью. Недостатки: сложность процедуры установки фотокамер и нанесения точек привязки; для калибровки требуется как минимум 4÷6 фотокамер; необходимо большое количество фотографий, для получения точной модели; высокая трудоемкость процедуры сшивки изображений для получения целостной модели.

Томография основана на исследовании внутренней структуры объекта посредством его многократного просвечивания в различных пересекающихся направлениях.

Представим классификацию видов оборудования (по методу) томографии [11].

По взаимному расположению источника зондирующего излучения, объекта и детектора, оборудование томографии может быть разделено на следующие группы:

- трансмиссионные - регистрируется зондирующее внешнее излучение, прошедшее через пассивный (неизлучающий) объект, частично ослабляясь при этом;

- эмиссионные - регистрируется излучение, выходящее из активного (излучающего) объекта с некоторым пространственным распределением источников излучения;

- комбинированные трансмиссионно-эмиссионные (люминесцентные, акустооптические и др.) - регистрируется вторичное излучение от объектов-источников, распределенных по объему исходного объекта и возбужденных внешним излучением;

- эхозондирование - регистрируется зондирующее внешнее излучение, отраженное от внутренних структур пассивного объекта.

По зондирующему излучению:

- с использованием звуковых волн (ультразвуковая, сейсмическая томографии);

- с использованием электромагнитного излучения (радионуклидная эмиссионная, однофотонная эмиссионная, двухфотонная эмиссионная или позитронно-эмиссионная, рентгеновская, рентгеновская компьютерная, оптическая (лазерная) томографии, томография в радиодиапазоне);

- с использованием электромагнитных полей (магнитно-резонансная, электро-импедансная томографии);

- с использованием элементарных частиц (нейтронная, электронная и позитронная, протонная, нейтринная томографии).

Сканирование на основе структурированного белого света заключается в проецировании на объект линий, образующих уникальный узор, каждое изменение которого сканируется приемной камерой. К преимуществам относятся большая скорость сканирования, получение до 1 000 000 точек сканирования за одно измерение, высокая точность и детализация элементов изделия, отсутствие контакта с измеряемой поверхностью и возможность сканирования человеческих лиц благодаря отсутствию лазерных лучей. Недостатками являются стационарная установка, исключающая возможность мобильного сканирования; ограничение по минимальным размерам сканируемого изделия; невозможность сканирования внутренних областей; сложность при сканировании объектов, находящихся вне помещений, ограничения по яркости; большая стоимость системы и необходимость проведения процедуры последующей обработки для объединения отсканированных частей.

Лазерная технология сканирования основана на проецировании лазерного луча на объект сканирования. Все искажения воспринимаются измерительной камерой, которая отслеживает положение лазерного луча, полученные данные передаются на компьютер. К преимуществам лазерного 3D сканера относятся не высокая стоимость для промышленного применения, возможность сканирования вне помещений, и при разной освещенности, отсутствие контакта с измеряемой поверхностью, возможность работы с объектами, недоступными для сканирования с использованием технологии белого структурированного света. Недостатками являются невозможность сканирования прозрачных, черно-белых объектов или с большой степенью светоотражения, поэтому, требуется их предварительная обработка [9].

Сканеры (координатно-измерительные машины) можно сгруппировать по типам исполнения (рис. 3) [12]:

- 3D-портальные;
- Стоечные;
- Шарнирно-сочлененные типа "рука";
- Шестиосевые на основе платформы Стюарта;
- Фото и рентгенографические;
- Лазерные дальнометры объемного сканирования.

Основные требования, предъявляемые к сканерам - точность и скорость измерений, простота в обучении персонала и эксплуатации сканера. Одним из типов точных сканеров по исполнению, ввиду хорошей сбалансированности конструкции и традиционной кинематики, являются 3D-портальные установки.

Большое количество производителей предлагают целый ряд моделей 3D сканеров с различными возможностями, техническими характеристиками и соответственно стоимостью. Стоимость 3D сканеров варьируется от нескольких тыс. до нескольких млн. евро. Для получения представления о технических возможностях современных сканеров в табл. 1 приведены для некоторых из них технические характеристики.

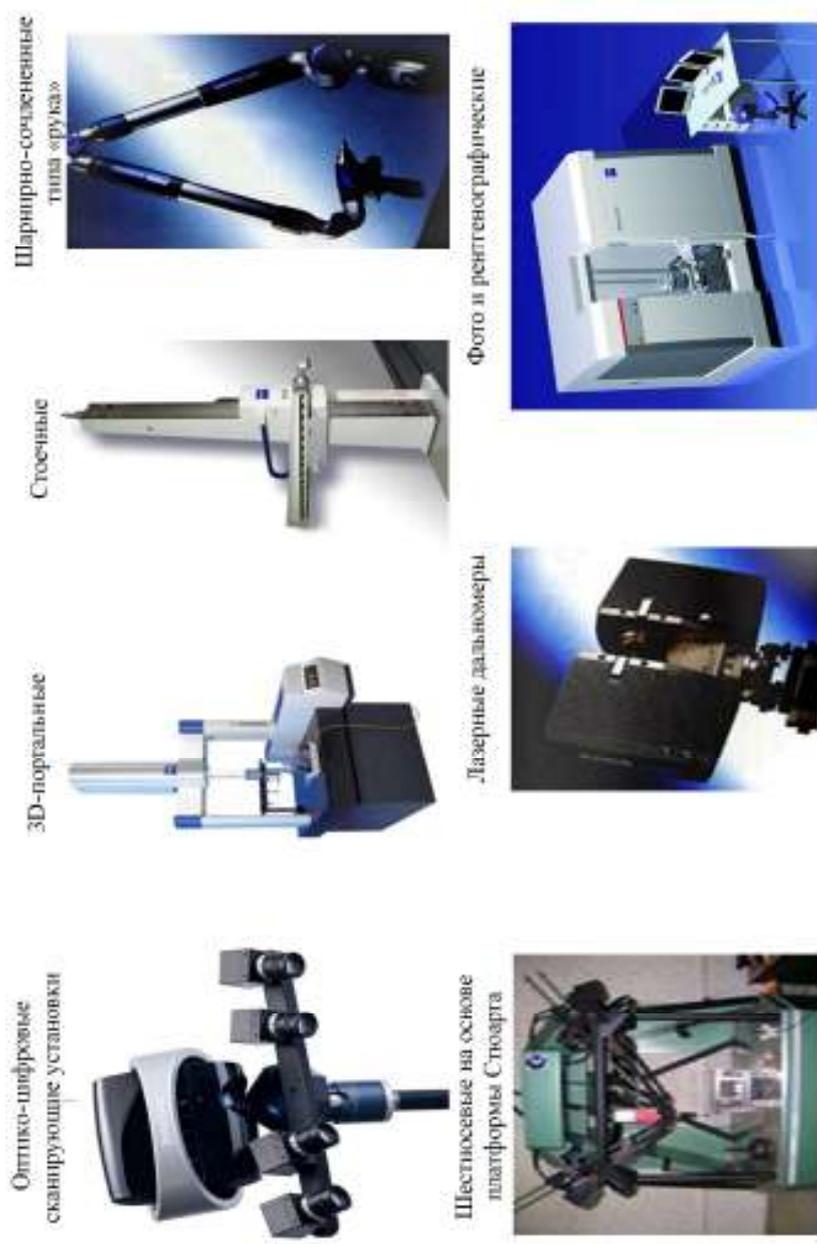


Рисунок 3 – Типы исполнения 3D-сканеров (координатно-измерительных машин)

Рисунок 3 – Типы исполнения 3D-сканеров (координатно-измерительных машин)

Таблица 1 – Технические характеристики 3D сканеров [13, 14, 15, 16]

Технология	Производитель	Модель	Рабочая зона, мм	Точность (разрешение), мм	Скорость сканирования
Контактный метод сканирования	Faro Tech.	FaroArm Advantage	1200-3700	от $\pm 0,090$ до $\pm 0,431$	
		FaroArm Platinum	1200-3700	от $\pm 0,018$ до $\pm 0,086$	
	Roland DGA Corp.	MDX-20	200×150×60	X, Y: 0,050 Z: 0,025	
	Mitutoyo	Euro-C-121210	1205×1205×1005	0,001	
	Hexagon Metrology	Multi GAGE	1200	0,005	
	IMS	Premier		0,0001	20 мм/с
Рентгеновская компьютерная томография	Aracor	Konoscope 160	max \varnothing 160	0,020	
	Micro Photonics Inc.	Skyscan 1172	max \varnothing 68	0,001	
Лазерная триангуляция	Perceptron	ScanWorks Lite		$\pm 0,050$	23040 точек/с
	Callidus Precision Syst.	CT180	350×375	0,100	4000 точек/с
	Metris	XC50 cross scanner	15×15	0,015	3*64000 точек/с
Лазерный дальномер	Faro Tech.	Laser Tracker		0,002 мм + 0,0004 мм на каждый метр до объекта	1000 точек/с
Лазерная технология	Romer	R-Scan		0,001	
Структурированный белый свет	Imetric	Iscan II	от 100 до 10000	0,040	
	Genex	Rainbow 25	32×25×20	0,025	442368 точек/с

Программное обеспечение Reverse Engineering

Современный рынок программного обеспечения предлагает большое многообразие специальных систем для решения задач обратного инжиниринга (табл. 2). В табл. 2 представлены некоторые компьютерные системы, сгруппированные по решаемым задачам обратного инжиниринга.

Таблица 2 – Существующее программное обеспечение для решения задач обратного инжиниринга [16]

Область применения	Основные функции	Программное обеспечение
Управление оборудованием обратного инжиниринга	Управление оборудованием обратного инжиниринга для получения систем измеренных точек и их обработки.	Mitutoyo Cosmos, Hymarc, Metris Scan, Cyberware CyDir и GSI Crystal Studio.
Обработка CAD-элементов	Обработка CAD-элементов получаемых на основе систем измеренных точек и триангуляционных моделей. CAD-элементы содержат, точки, линии сканирования и базовые CAD-элементы (окружность, прямоугольник, цилиндр и т.д.).	ICEM surf, Imageware и другие CAD-системы, такие как UG, ProEngineer и Solidworks.
Обработка элементов триангуляционной модели	Редактирование, модификация и оптимизация 3D триангуляционной модели.	Magics RP, DeskArtes. Catia Shape Sculptor и Viscam RP.
Проектирование триангуляционной и поверхностной (NURBS) модели	Обеспечивается полный набор инструментов обработки данных обратного инжиниринга от работы с системами измеренных точек и триангуляционными моделями до создания NURBS поверхностей, а также 3D контроля.	GSI Studio, CopyCAD, Rapidform, Gcomagics, Polyworks (Modeler) и Paraform.
Обработка 2D изображений и 3D моделирование	Обработка сканированных 2D изображений (СТ/MRI) и 3D реконструкция.	Mimics, Rapidform, BioBuild, Velocity2, Amira, Scan IP, Analyze и 3D Doctors.
3D контроль (верификация)	Использование для 3D контроля, создания и анализа карты погрешностей и ведения документации.	COMETinspct, Metris Focus Inspection, PowerINSPECT, PolyWorks Inspector и Geomagic Qualify.
Поверхностное (NURBS) и твердотельное моделирование	Обеспечивается инструментами поверхностного моделирования и редактирования CAD-элементов.	PowerSHAPE, ProEngineer, UG, Solidworks, Catia и Rhino.

При обратном инжиниринге промышленных изделий на базе центра высоких технологий учебно-научно-производственного объединения при НТУ «ХПИ» (кафедра "Интегрированные технологии машиностроения" им. М.Ф. Семко) использовалось несколько систем (CoryCAD, Geomagic Studio и Magics RP) для работы с триангуляционными моделями. Рассмотрим особенности этих САД-систем и выполним их сравнительный анализ.

Система CoryCAD (компания Delcam plc). Система использует системы точек с координатно-измерительных машин или 3D сканеров работающих бесконтактным методом, и позволяет генерировать поверхностные модели, для последующего экспорта в САД-формате и возможности редактирования в большинстве систем моделирования. CoryCAD позволяет решить ряд задач [17]:

- создания трехмерных моделей на основе систем точек;
- сохранения особенностей рельефа поверхности модели при редактировании;
- выдавливания трехмерных эмблем и художественных орнаментов на поверхности;
- 3D визуализации;
- верификации.

Для создания поверхностей из отсканированных данных необходимо выполнение несколько основных стадий [18]: импорт данных (систем точек), создание структуры линий сканирования или точек, смещение линий сканирования с учетом диаметра шарикового шупа, генерирование триангуляционной модели, генерирование поверхностей, верификация модели, экспорт данных (в форматах DUCT, IGES, STL).

CoryCAD использует различные уровни структуры построения модели из импортируемых данных. Структура может состоять из следующих объектов [19]:

- Точки (объект низшего уровня), которые могут быть получены при использовании контактного или бесконтактного метода. Исследование точечной модели является важным шагом при создании качественной триангуляционной модели.

- Линии сканирования образуют структуру точечной модели в виде нескольких упорядоченных множеств точек. Если система точек была получена при использовании координатно-измерительной машины, то точки, как правило, находятся на большом расстоянии друг от друга. В этом случае лучше использовать линии сканирования для создания триангулированной модели. Если модель получена с использованием бесконтактного метода сканирования, тогда используются точки для создания триангуляционной модели.

- Триангуляционная модель, импортируется или создается на основе данных сканирования. Триангуляционная модель не должна иметь

разрывов поверхности или перекрытий между треугольниками. CoreCAD снабжен модулем TriFIX, который позволяет исправлять некоторые дефекты триангуляционной модели (наслоение нескольких поверхностей, перекрещивающиеся треугольники и пр.). Триангуляционные модели экспортируются в следующих форматах: STL (для материализации технологиями Rapid Prototyping) и DMT (используется для создания программ фрезерной обработки в программном пакете PowerMILL).

- Поверхностные модели, импортируются или создаются на основе триангуляционной модели. Также существует возможность импорта поверхностной модели из CAD пакета PowerSHAPE, которая затем триангулируется и далее экспортируется в формат STL. Получение поверхностной из триангуляционной модели позволяет воспроизвести CAD модели из отсканированной системы точек.

Система Magics RP (компания Materialise, Бельгия). Система используется для создания и редактирования триангуляционных моделей. Ориентирована на подготовку моделей для их материализации с использованием технологий Rapid Prototyping [20].

Автоматически созданные триангуляционные модели, как правило, содержат перевернутые треугольники, разрывы поверхности или другие ошибки геометрии, которые требуют корректировки. Magics RP кроме инструментов автоматического устранения дефектов, также имеет инструменты для работы на уровне отдельных треугольников.

К особенностям работы в программном пакете можно отнести обнаружение и автоматическое исправление большей части дефектов триангуляционных моделей, сборка частей модели, анализ геометрии модели детали (или сборочной единицы) с использованием инструментов сечения, выполнение замеров на плоскости или в пространстве, верификация размеров после материализации, автоматизированное создание документации технологического процесса.

Все предлагаемые функции могут быть сгруппированы в две категории: редактирование и корректировка триангуляционных моделей. Возможности редактирования триангуляционных моделей: обрезка модели; создание отверстий; сборка моделей деталей из нескольких частей; объединение нескольких объектов, создание простейших геометрических тел: сфера, цилиндр, параллелепипед, конус, пирамида, призма и пр.

Система Geomagic Studio (компания Geomagic). Это система для проведения обратного инжиниринга изделий, позволяющая создавать поверхностную модель объекта по данным сканирования [21].

Программный пакет обеспечивает высокую скорость работы с большими объемами данных (до 100 миллионов точек), поддерживает

взаимодействие с различными видами сканирующих устройств и выполняет импорт и экспорт данных для различных форматов.

Программный пакет Geomagic Studio состоит из четырех основных модулей [21, 22].

Модуль Geomagic Capture предназначен для сбора систем точек с помощью сканера, совмещения данных, полученных при различных положениях детали или сканирующего устройства, а также для интеллектуальной фильтрации и редактирования набора систем точек (удаление "выбросов", "шумов" и т. д.).

Модуль Geomagic Wrap предназначен для триангуляции точечной модели и редактирования полученной триангуляционной модели (заполнения разрывов, уменьшения количества треугольников, сглаживания поверхностей, заострения граней и т. д.). Системы измеренных точек могут импортироваться в тех же форматах, которые использует модуль Geomagic Capture.

Модуль Geomagic Shape автоматически обнаруживает изгибы поверхностей объекта и преобразовывает триангуляционные модели в NURBS-поверхности. При этом обеспечивается автоматическое сохранение топологии формы. Реализованы возможности организации и слияния отдельных фрагментов поверхностей.

Модуль Geomagic Fashion предназначен для распознавания первоначального дизайна объекта и подготовки к импорту в CAD/CAM системы. В результате обработки реконструируются стандартные геометрические элементы (плоскости, цилиндры, сферы и т. д.), которые составляют часть поверхности объекта.

Процесс создания модели изделия в программном пакете Geomagic Studio состоит из 3-х этапов [23]:

1. Обработка набора систем точек (Capture) состоит из регистрации множества точек, удаления лишних, снижения шумов, объединения отсканированных изображений и выполнения триангуляции.

2. Обработка полигонов (Wrap) включает в себя упрощение данных, восстановление триангуляционных поверхностей (заполнение отверстий, восстановление кромок), их редактирование (логические операции, усреднение повторяющихся элементов) и подготовку к материализации модели изделия по технологии Rapid Prototyping.

3. Создание NURBS-поверхностей (Shape) выполняется автоматически или интерактивно (определение кривых, конструирование вставок, создание параметрической сетки, подгонка поверхностей) затем проводится анализ отклонений (при сравнении с системой измеренных точек) и экспорт данных.

Сравнительный анализ возможностей программных пакетов для обработки результатов объемного сканирования

Все выше представленные системы разработаны для решения задач обратного инжиниринга, но каждый из них имеет свою рациональную область применения. Система CopyCAD специализируется на координатно-измерительных машинах. При этом имеет важное преимущество - позволяет перейти сразу от точечной к поверхностной модели. Такой подход обеспечивает дальнейшее редактирование трехмерной модели в САД-системах, пропуская шаг преобразования триангуляционной модели в поверхностную тем самым, уменьшая погрешность создания модели и время на ее обработку.

Система Magics RP отличается тем, что предоставляет возможность работы на более "подробном" уровне с триангуляционными моделями. Работа с наименьшими элементами модели может обеспечить решение задач по редактированию трехмерной модели на другом уровне. Отличие пакета, создание небольших по размеру файлов, по сравнению с Geomagic Studio. Система Magics RP ориентирована на решение задач по подготовке модели к материализации технологиями Rapid Prototyping.

Для работы с триангуляционными моделями изделий, полученными по данным с оптико-цифровой установки, наиболее полно реализовала возможности система Geomagic Studio. В отличие от других пакетов сшивание разрывов поверхностей выполнялось наиболее точно, без потерь рельефа поверхности. В дополнение к автоматическому режиму, в случае некачественного сшивания поверхностей, предлагается ряд инструментов позволяющих вручную выполнить обработку участка поверхности с достаточной точностью. Некоторые операции выполняются с поддержкой нескольких ядер процессора компьютера, что значительно ускоряет процесс обработки. Geomagic Studio и CopyCAD имеют в наличии инструмент по визуальному анализу погрешности (верификации) полученной триангуляционной модели по сравнению с системой измеренных точек (или другой моделью).

Системы Geomagic Studio и CopyCAD решают целый ряд задач обратного инжиниринга. Системы обеспечены полным набором инструментов обработки систем измеренных точек, работы с триангуляционными моделями, для создания NURBS поверхностей и выполнения 3D контроля.

Заключение

В настоящее время существует достаточно широкий спектр аппаратных и программных средств по решению задач обратного инжиниринга. Однако при этом отсутствуют четкие рекомендации по

выбору этих средств и определению стратегии обратного инжиниринга с учетом особенностей конкретных групп изделий.

Сравнительный эксплуатационный анализ САД-систем (CоруCAD, Geomagic Studio, Magics RP) по созданию и редактированию триангуляционных моделей позволил выявить их некоторые функциональные особенности.

Система CоруCAD наиболее полно реализует свои функциональные возможности при создании поверхностной модели на основе систем измеренных точек и триангуляционной модели.

Geomagic Studio предлагает обширный набор инструментов по работе с триангуляционной моделью, позволяющий качественно устранять дефекты поверхности.

Систему Magics RP предпочтительно использовать для работы на более детализованном уровне с триангуляционными моделями, а также для решения задач подготовки моделей к материализации технологиями Rapid Prototyping.

Список литературы: 1. *Клименко В.Ю.* Реверсный инжиниринг: учебн. пособие, Запорожье, 2009. -116 с. 2. *Алябьева А.Д.* Лазерное сканирование объектов и территорий // *Технология 2000.* - 2000.- WEB: <http://www.tech-2000.ru>. 3. *Лебедев А.В.* Применение сканеров Artec и услуги по дигитализации объектов // *Современные средства измерительной техники.* - 2002. - WEB: <http://www.koda.ua>. 4. Аметист 3D. 3D-сканирование и моделирование. - Санкт-Петербург: Ninsis, 2003. Web: <http://www.ametist.com/3D/using.php>. 5. Range Vision. Разработка 3D сканеров. - Web: <http://www.rangevision.com/content/blogcategory/22/43/>. 6. 3DNews Daily Digital Digest. - Web: <http://www.3dnews.ru/>. 7. Cybercom - сканеры 3D принтеры. - Web: <http://www.cybercom.ru>. 8. Midgart. Центр объемной печати. - Web: <http://www.midgart.ru>. 9. Журнал для профессионалов в области САПР. CAD master. - Web: <http://www.cadmater.ru>. 10. *Ричардсон Р.* Сканируя пространство. "Экспресс-Электроника", №10. – 2003. - Web: <http://citforum.univ.kiev.ua>. 11. Томография. - Web: <http://ru.wikipedia.org>. 12. *Горбач Ф.И., Макаров С.О.* Контроль и диагностика - координатно-измерительные машины: точность нового поколения // *Оборудование и инструмент для профессионалов. Серия металлообработка.* – 2009. - №3. - Web: <http://www.info-ua.com>. 13. Обзор продуктов FARO. - Web: <http://products.faro.com>. 14. 3D сканеры (трехмерные): разработка и сопровождение. - Web. rangevision.com. 15. Координатно-измерительные машины Hawk с лазерной сканирующей головкой. Web: www.rosinox-tool.ru. – 1996. – 385 с. 16. *Raja, Vinesh; Fernandes, Kiran J.* Reverse Engineering - An Industrial Perspective. Springer. 2008. - pp. 242. 17. Delcam – CAD/CAM Software Creators. - Web: <http://www.delcam.com>. 18. Делкам - Урал - Лицензионное программное обеспечение для автоматизации проектирования (САПР) и решений инженерных задач. - Web: <http://www.delcam-ural.ru>. 19. Делкам - Новосибирск. - Web: <http://www.spider.nrcde.ru>. 20. Компания Bibus Украина. - Web: <http://bibus.com.ua>. 21. Инжиниринговая компания ТЕСИС. - Web: <http://www.thesis.com.ru>. 22. Geomagic: 3D Software for creating 3D models from 3D scanner data. - Web: <http://www.geomagic.com>. 23. Форум САПР 2000. - Web: <http://www.fsapr2000.ru>.

B. KARPUSCHEWSKI, Prof. Dr.-Ing. habil., **H.-J. PIEPER**, Dr.-Ing.
O. KUSHNARENKO, Dr.-Ing., Magdeburg, Deutschland

AUSWAHL GENERATIVER PROZESSKETTEN FÜR DIE HERSTELLUNG METALLISCHER ENDPRODUKTE

У даній статті розглядаються питання аналітичної оцінки процесу селективного спікання і його технологічних ланцюжків у порівнянні із традиційними технологіями виробництва. Критеріями порівняння є якість, час обробки, завитрати, а також складність геометрії виробу. Існуючі методи планування й забезпечення якості повинні бути доповнені з урахуванням нових можливостей изготовления виробів, які відкривають генеративні методи. Застосування генеративних технологій для виготовлення металевих кінцевих продуктів економічно Обосно-Вано тільки для деталей зі складною геометрією й малим розміром.

В данной статье рассматриваются вопросы аналитической оценки процесса селективного спекания и его технологических цепочек в сравнении с традиционными технологиями производства. Критериями сравнения являются качество, время обработки, затраты, а также сложность геометрии изделия. Существующие методы планирования и обеспечения качества должны быть дополнены с учетом новых возможностей изготовления изделий, которые открывают генеративные методы. Применение генеративных технологий для изготовления металлических конечных продуктов экономично обосновано только для деталей со сложной геометрией и малого размера.

The application of generating processes for the creation of metal end-products can only be applied economically with small batch size and geometrically high-complex workpieces. This paper concerns the analytic evaluation of several additive methods and its process chains and compares these with traditional manufacturing technologies regarding the quality, processing time, expenses as well as the complexity of the product. The existing methods of process planning and the assurance of the quality are extended with a focus on the new manufacturing possibilities which can be realized by the application of additive processes.

Einleitung

Für die Herstellung von metallischen Endprodukten wird in der heutigen Zeit eine Vielzahl von Verfahren auf dem Markt angeboten. Dabei stehen Rapid-Verfahren im Wettbewerb zu den konventionellen Verfahren. Generell spricht der Kostenfaktor, insbesondere bei großen Stückzahlen, für die konventionellen Verfahren. Betrachtet man allerdings die sehr hohe Flexibilität, die Freiheit bei der Bauteilgestaltung und die niedrigen Herstellungszeiten, wird das weit reichende Potenzial von generativen Verfahren in Bereichen wie Automobilbau, Weltraumtechnik und Medizin deutlich [1, 2]. Die erreichbaren

Oberflächenqualitäten sind nicht mit denen spanender Verfahren vergleichbar; anwenderspezifisch jedoch oft ausrechend [3].

In der Literatur werden lediglich 15 % aller Anwendungen [4] der generativen Verfahren als Rapid Manufacturing ausgewiesen. Darunter die Anwendungen für metallische (ein rein metallisches Pulver, ohne Kunststoffanteil) und nichtmetallische Endprodukte. Rapid Manufacturing hat folgende Merkmale:

- die Eigenschaften weisen alle Merkmale des Endproduktes auf
- das Material ist identisch mit dem Endprodukt und die Konstruktion entspricht der des Endproduktes.

Die generativen Verfahren zur Herstellung metallischer Endprodukte unterscheiden sich nach Energiequelle (Laser-, Elektronenstrahl) und nach Werkstoffzustand (Draht, Folie, Pulver). Die Verfahren, die Pulver als Ausgangswerkstoff verwenden, unterteilen sich ihrerseits auf Pulver-Düse und Pulverbettverfahren.

Ein Pulverbettverfahren ist z.B. das Selektive Laserschmelzen (Bild 1). An diesem Verfahren wird das Prinzip generativer Verfahren dargestellt. Praktisch alle generativen Verfahren benötigen als erstes ein geschlossenes dreidimensionales Volumenmodell. Als zweites muss das 3D-Modell in ein STL-Format umgesetzt werden. Als drittes wird das Volumenmodell im Bauraum der Anlage positioniert, und es werden, sofern erforderlich, Stützkonstruktionen generiert. Danach wird das Bauteilvolumen anlagenabhängig in Schichten von 5 bis 200 μm zerlegt. Es können sich auch mehrere Bauteile in mehreren Schichten in der Anlage befinden. Die Prozessparameter werden festgelegt und zur Anlage weitergeleitet.

Nachfolgend wird auf eine Plattform eine Pulverschicht entsprechender Dicke aufgetragen. Danach wird unter Nutzung des Laserlichtes das metallische Pulver aufgeschmolzen und erstarrt; die Bauplattform wird abgesenkt; das Pulver wird ein weiteres Mal aufgetragen und der Prozess wiederholt sich. So wird ein Bauteil schichtweise generiert.

Nach dem Prozess wird das Bauteil aus dem Arbeitsraum entnommen, von Pulverresten befreit und gereinigt, vorhandene Stützkonstruktionen werden entfernt.

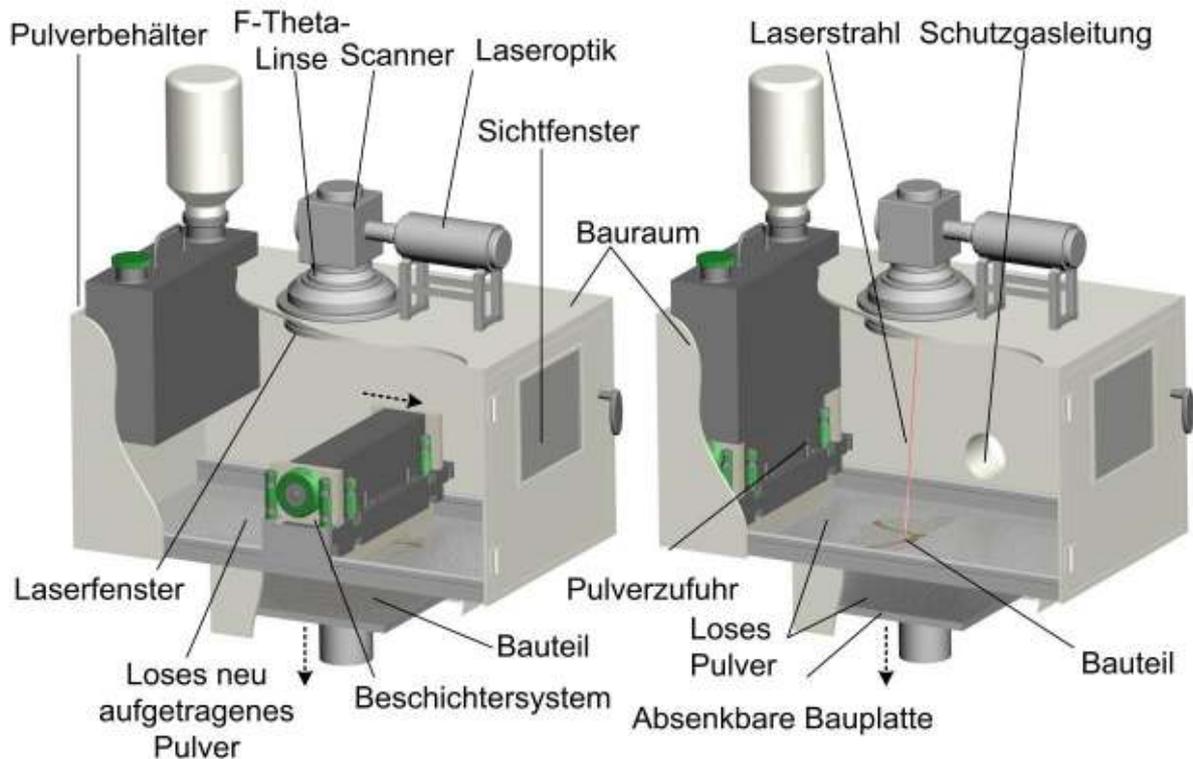


Bild 1 – Selektives Laserschmelzen

Es gibt bestimmte Hindernisse, warum generative Verfahren für die Herstellung metallischer Endprodukte nicht so oft angewendet werden:

- Investitionskosten sind zu hoch.
- Es fehlt eine strukturierte Darstellung spezifischer Informationen über die Rapid Manufacturing Verfahren.
- Es gibt noch keine umfassende Methodik zur Bestimmung von Qualitätsmängeln und deren Ursachen.
- bisher getroffene Vergleiche mit den konventionellen Verfahren sind unzureichend.
- Außerdem existiert für die generativen Verfahren noch keine Norm.

Die Entwicklung einer Methodik zum Prozesskettenvergleich und zur -auswahl soll zur vermehrten Anwendung generativer Verfahren beitragen, die Kosten zur Fertigungsvorbereitung senken und einen Überblick über die ganze generative Prozesskette von der Entwicklung eines Produktes bis zu seiner Herstellung geben.

In der Arbeit [5] hat sich der Ablauf der Entscheidungsfindung in drei Ebenen herauskristallisiert.

1. Ebene:

- Bestimmung der geometrischen und technologischen Bauteilkomplexität
 - Suche nach einem Werkstoff, der die gestellten Anforderungen erfüllt
- Ergebnis: Bauteil kann durch generative Verfahren hergestellt werden.

2. Ebene:

- Bewertung der Qualität der generativ hergestellten Bauteile
- Feststellung der Einflussgrößen
- Auswahl der angepassten Prozessparameter

Ergebnis: Bauteil wird nach angegebenen Kriterien hergestellt.

3. Ebene:

- Zusammenstellung der Prozessketten
- Vergleich der Ketten mit Hilfe der aufgestellten Kriterien

Ergebnis: Vorschlag für eine geeignete Prozesskette.

Für diese Entscheidungsmethodik sollen relevante Informationen und Bewertungsverfahren bereitgestellt werden.

1 Geometrische und technologische Bauteilkomplexität

Die Einordnung der Bauteile bei den generativen Prozessen gewinnt immer mehr an Bedeutung [6]. Deshalb sind die Klassifizierung der Bauteilkomplexität und das Ermitteln der erreichbaren Qualität ein erster Schritt für die Integration der generativen Verfahren zur Herstellung von Endprodukten. Durch die Anwendung der von [7] vorgeschlagenen Formel (1) wurde festgestellt, dass bei einem Gk größer 5 generative Verfahren angewendet werden können (Bild 2).

$$Gk = W_{Hg} + \sum (W_{Ng_i} * n_i * a_i * f_G) \quad (1)$$

Gk – Komplexitätsgrad, W_{Hg} – Wichtungsfaktor des Hauptgeometrieelementes, W_{Ng} - Wichtungsfaktor des Nebengeometrieelementes i , n_i – Anzahl des Hauptgeometrieelementes i , a_i - Anordnung des Geometrieelementes zum Hauptgeometrieelement, f_G – Größenfaktor, i – Zählindex.

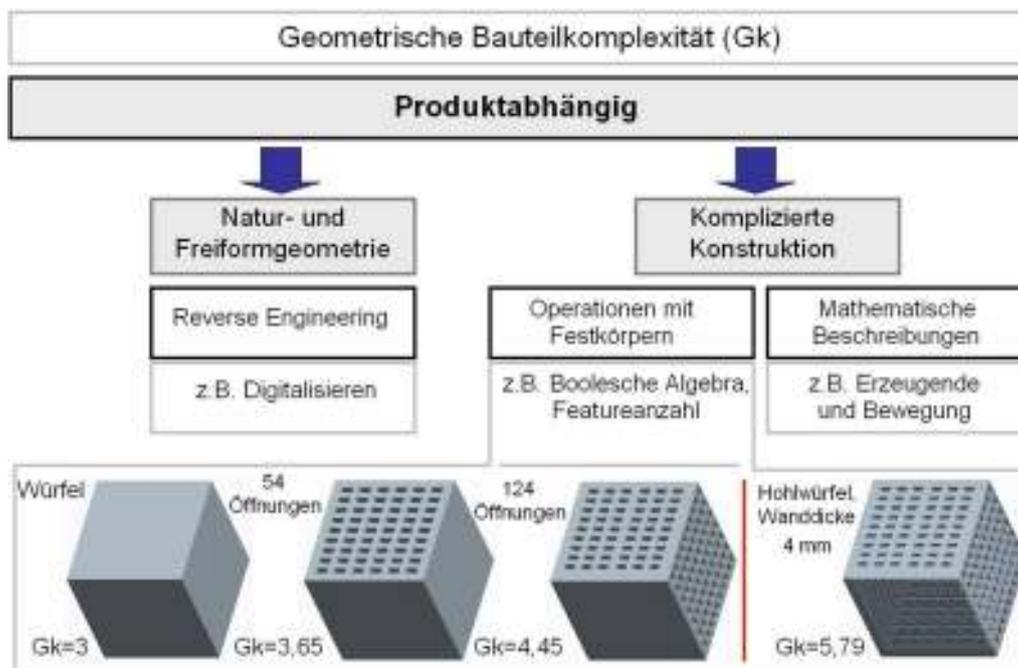


Bild 2 – Geometrische Bauteilkomplexität

Technologische Bauteilkomplexität bezieht sich auf die Anwendung konkreter Fertigungsverfahren und bestimmter Anlagen, als auch auf andere Parameter, wie z.B. die werkstoffspezifischen Eigenschaften eines Bauteils, Stückzahl, Fertigungszeit und -kosten. Für die Auswertung der technologischen Bauteilkomplexität spielen zum Beispiel die Größe des Bauteils und die Prozessbeschränkungen eine Rolle. So werden generative Verfahren oft durch die Bauraumgröße und die Mikrogeometrie als auch durch den Laserdurchmesser und die Schichtdicke beschränkt (Bild 3).

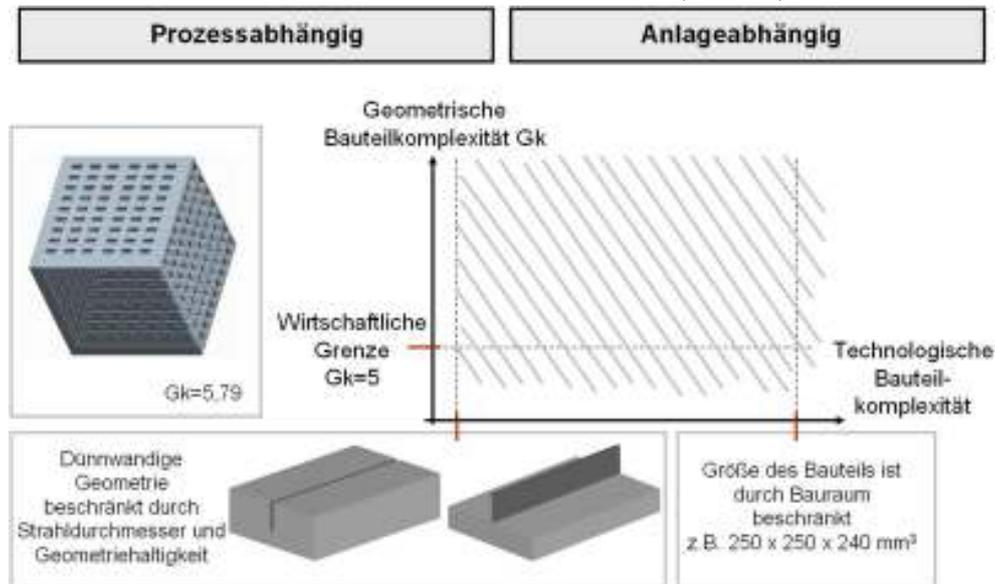


Bild 3 – Technologische Bauteilkomplexität

2 Werkstoffauswahl

In [5] wurde ein Informationssystem metallischer Werkstoffe entwickelt. Die Werkstoffe wurden in zwei Gruppen eingeteilt: genormte und Firmenspezifische Werkstoffe. Zu den genormten gehören z.B. Stähle (Edelstahl (X2CrNiMo17132 W.Nr. 1.4404), Warmarbeitsstahl (X3NiCoMoTi18-9-5 W.Nr. 1.2709) usw.), zu den Firmenspezifischen: stahlähnliche Pulver (wie z.B. StainlessSteel) und verschiedene Legierungen (Kobalt-Chrom-Molybdän-, Titan-, Aluminium basierte usw.). Das System beinhaltet wichtige Eigenschaften der angewendeten Werkstoffe, wie die chemische Zusammensetzung, die mechanischen Eigenschaften usw. und kann weiter ergänzt werden. So ein Informationssystem spielt eine große Rolle bei der Auswahl generativer Prozessketten.

3 Bewertung der Qualität von generativ hergestellten Bauteilen

Auftretende Qualitätsmängel im Fertigungsprozess sind zunächst zu erfassen und zu systematisieren. Bei SLS/SLM sind folgende Qualitätsmängel bekannt:

- Geometrieabweichungen,
- „Treppen“- Effekt,
- hohe Rauheit,
- nicht geschlossene Poren im Bauteilvolumen,
- nicht geschmolzene Pulver auf der Oberfläche und in den entstandenen Poren.

Diese Mängel sind in Bild 4 zu sehen.

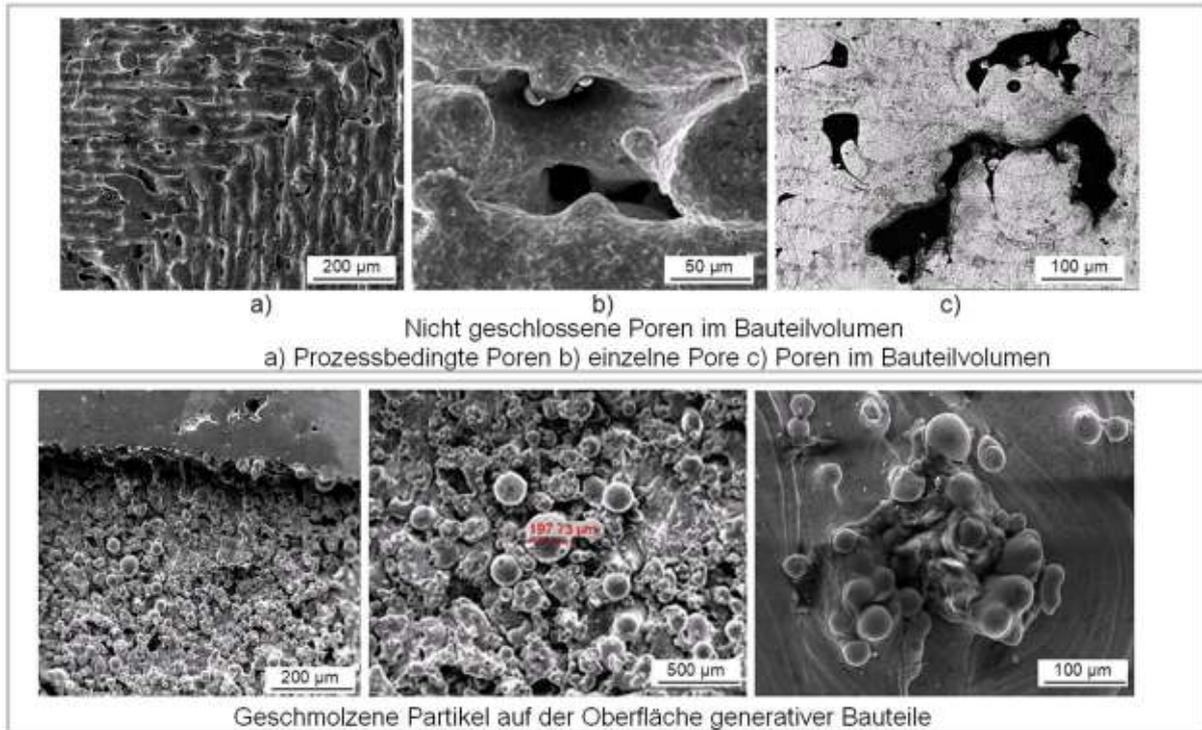


Bild 4 – Mögliche Qualitätsfehler bei SLS/SLM-Bauteilen

In der Literatur wird darauf hingewiesen, dass die Bauteilqualität oft von der Belichtungsstrategie abhängig ist. In den letzten Jahren werden die Methodiken [8] dargestellt, wie dargestellte Qualitätsmängel reduziert werden können. Weiterhin wird auch unsere eigene Vorgehensweise dargestellt (Punkt 4).

Für die zweite Etappe ist es wichtig, Informationen über die Qualität generativ hergestellter Bauteile zusammen zu fassen. Dafür müssen die Probekörpergeometrien festgelegt werden. In den Arbeiten [9, 10, 11, 12] wurden Probekörper für generative Fertigungsverfahren dargestellt, um die erzielte Geometrie und Oberflächenabweichungen zu analysieren. Diese Probekörper bestanden aus einfachen geometrischen Elementen und dienten der Analyse der Möglichkeiten konkreter Anlagen. Diese Probekörper sind nicht geeignet um den Einfluss der Prozessparameter auf die angegebenen Eigenschaften zu untersuchen. Bei der Auswahl der Probekörper für die

Variation der Prozessparameter wird empfohlen, eine einfache reproduzierbare Geometrie auszuwählen.

Zur Untersuchung der *Geometriehaltigkeit* [5] wurden zwei Referenzgeometrien hergestellt. Jeweils eine konvexe und eine konkave Geometrie. In Bild 5 ist nur die konvexe Geometrie dargestellt. Diese Probekörper wurden auf dem Anlagensystem F&S RealizersSLM aus Stahl 1.4404 hergestellt.

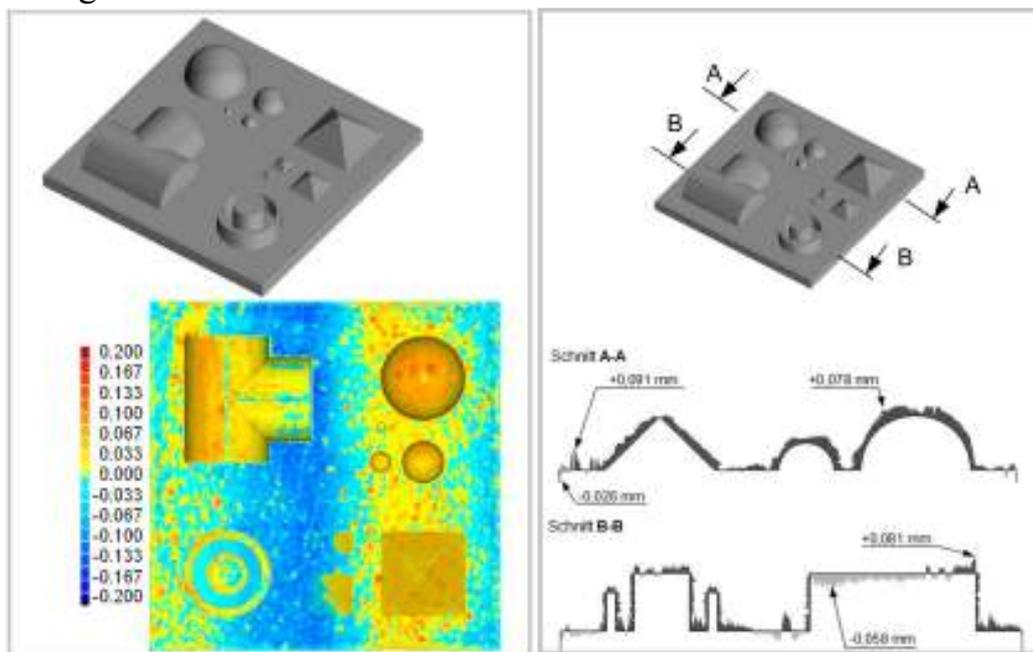


Bild 5 – Analyse der Geometriehaltigkeit

Bei der Analyse der Geometriehaltigkeit der konvexen und konkaven Geometrie wurde festgestellt, dass entsprechend 60 % bzw. 70% der Bauteiloberfläche innerhalb eines gewählten Toleranzbereiches liegen und die maximale Geometrieabweichung $\pm 200 \mu\text{m}$ beträgt. Diese Abweichungen sind durch viele Faktoren bestimmt. Die Ursachen können sowohl in einer ungleichmäßigen Pulverbeschichtung als auch in einer thermisch resultierenden Zug- und Druckspannung im Bauteil liegen. Solche thermischen Spannungen könnten durch eine Bauteiltemperierung im Bauprozess vermieden werden. Weitere Gründe können auch in der verwendeten Pulverkorngroße und den realisierten Schmelzbahngrößen liegen. Außerdem ist die Oberfläche des Bauteils sehr rau, und dies beeinflusst die Messergebnisse. Die Messergebnisse weisen daraufhin, dass generativ hergestellte Bauteile auf jedem Fall nachbearbeitet werden müssen.

4 Vorgehensweise zur Verbesserung der Bauteilqualität

Diese oben erwähnten Qualitätsmängel können von verschiedenen Einflüssen abhängig sein. Unter anderem sind sie Prozessbedingt

(Belichtungsstrategie, Laserleistung Belichtungsgeschwindigkeit). Zur Verbesserung der Qualität (Oberflächenrauheit und Dichte) wurde die folgende Vorgehensweise für die Anlage F&S Realizers^{SLM} angeboten. Diese Vorgehensweise besteht aus 3 Versuchsreihen. Das Ausgangsbauteil hat eine Oberflächenrauheit Ra 16 µm und eine Dichte von 96 %. Die Versuche wurden für den Werkstoff Stahl 1.4404 durchgeführt.

Bei der 1. Versuchsreihe wurde die Laserleistung variiert und die Belichtungsgeschwindigkeit blieb konstant. Es wurde das Verhältnis der Laserleistung zur Belichtungsgeschwindigkeit ermittelt, die so genannte Streckenenergie. Aus allen Probekörpern der ersten Versuchsreihe wurde der Körper Nummer 12 ausgewählt, da bei diesem die Rauheit minimal und die Geschwindigkeit relativ hoch war. Die Prozessparameter wurden für die zweite Versuchsreihe übernommen (Bild 6).

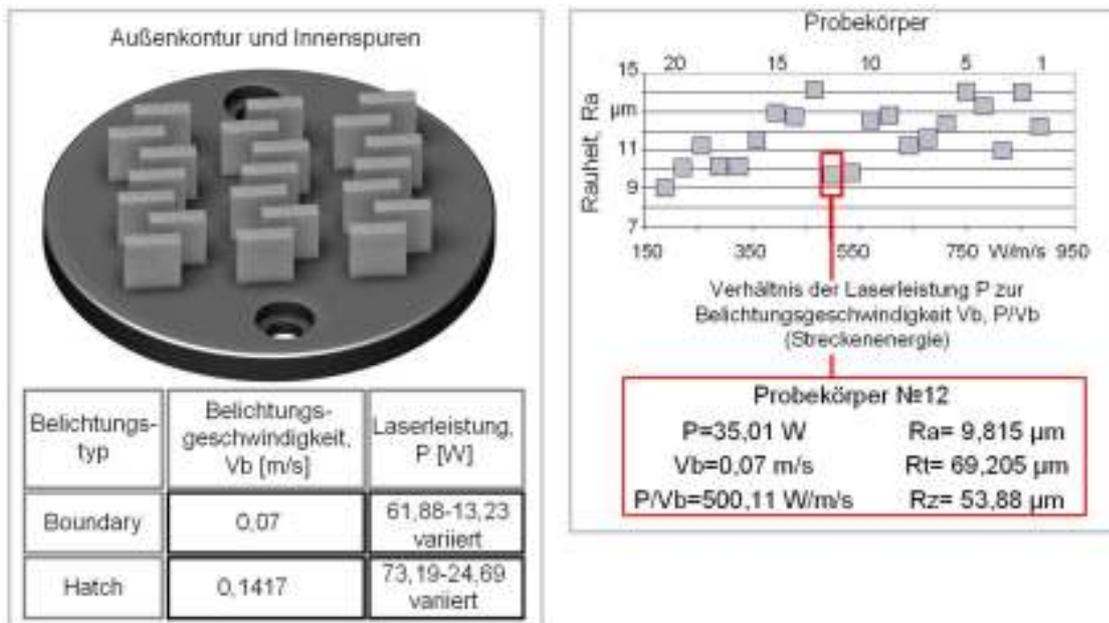


Bild 6 – Ergebnisse der ersten Versuchsreihe

In der zweiten Versuchsreihe wurde die Streckenenergie konstant gehalten und die Belichtungsgeschwindigkeit variiert. Die Parameter des Probekörpers Nr. 6 wurden übernommen, weil bei diesem weniger Laserleistung im Verhältnis zu einer guten Oberflächenrauheit gebraucht wurde.

Da die Oberflächenrauheit von den Parametern der Außenkontur abhängig ist, wurde entschieden, in der 3. Versuchsreihe 7 Probekörper herzustellen, die ausschließlich aus Außenkonturen bestehen. Für ein aussagekräftiges Ergebnis wurden alle vier Seiten der Probekörper untersucht. Die günstigsten Prozessparameter wurden ausgesucht. Probekörper Nr. 4 hatte eine relativ niedrige Rauheit bei weniger Laserleistung.

Durch diese drei Reihen wurden die Prozessparameter mit der geringsten Oberflächenrauheit und den kürzesten Prozesszeiten bestimmt, die für den Werkstoffes 1.4404 gelten. Trotz einer verringerten Bauteilrauheit (von 16 μm auf 7 μm) und einer erhöhten Dichte von 98,6 % ist die Nachbearbeitung bei der Herstellung metallischer Endprodukte unvermeidbar.

Durch diese Vorgehensweise wurde gezeigt, dass Verbesserungspotenzial existiert. Außerdem senkt die Reduzierung der Rauheit die Nachbearbeitungskosten.

5 Generative Prozessketten

Dieser Teil gehört zur 3. Etappe der Entscheidungsmethodik. Prinzipiell werden die gleichen Verfahren zur Verbesserung generativ hergestellter Bauteile, wie bei den konventionellen Teilen angewendet. Wichtig ist die direkte einstufige und mehrstufige Prozesskette zu unterscheiden. Bei der direkten einstufigen Prozesskette geht es um das Trennen des Bauteils von der Bauplattform, das Entfernen von Stützkonstruktionen (falls vorhanden) und die Reinigung. Um die Rauheiten zu verkleinern und anhaftende Pulverreste zu entfernen, wird am häufigsten das Mikrostrahlen benutzt. Erfahrungsgemäß ist es möglich, mittels Mikrostrahlen die Oberflächenrauheit um 50-80 % zu senken. Dabei ist anzumerken, dass bei den angewendeten Technologien Rauheiten bis zu $R_a = 30 \mu\text{m}$ in Abhängigkeit vom Anlagentyp, Werkstoff und der gewählten Strategie auftreten können. Dies bedeutet, dass für die meisten Anwendungen generativ hergestellte Bauteile in einer mehrstufigen Prozesskette bearbeitet werden müssen, es sind also weitere Prozesse nötig, um die Qualitätsmängel der generativen Bauteile zu beseitigen.

Durch die Durchführung selbständiger Versuche, Simulationen und durch die Informationsbereitstellung [5] wurde festgestellt, dass sich die Fräsbearbeitung am besten als Post-Prozess zur Verbesserung der Bauteilqualität eignet. Abtragende Verfahren können aus Zeit- und Kostengründen, da hier nur eine Elektrode für die Endbearbeitung zum Einsatz kommen soll, neben dem Fräsen, als Postprozess angewendet werden. Durch weitere Versuche wurde nachgewiesen, dass das Laserstrahlabtragen nur beschränkt für die Nachbearbeitung angewendet werden kann. Das Schleifen kann nur für die Bearbeitung der Planflächen effektiv genutzt werden (Bild 7).

Diese Ergebnisse wurden durch die Halbmatrix Analyse mit der Berücksichtigung der ausgewählten Kriterien bestätigt.

6 Wirtschaftlichkeit generativer Verfahren

In [5] wurde die Berechnung der Fertigungseinzelkosten für einen der oben erwähnten Probekörper durchgeführt. Die Ergebnisse der Berechnungen zeigen, dass konventionelle Verfahren für die Herstellung dieses konkreten Probekörpers deutlich vorteilhafter sind. So sind z.B. die Fertigungseinzelkosten für generative Verfahren zweimal so hoch wie bei konventionellen Verfahren.

Anderes ist dies für Teile mit dem Geometriekomplexitätsgrad größer Fünf. Hier sind die Kosten niedriger als bei konventionellen Verfahren (Bild 8).

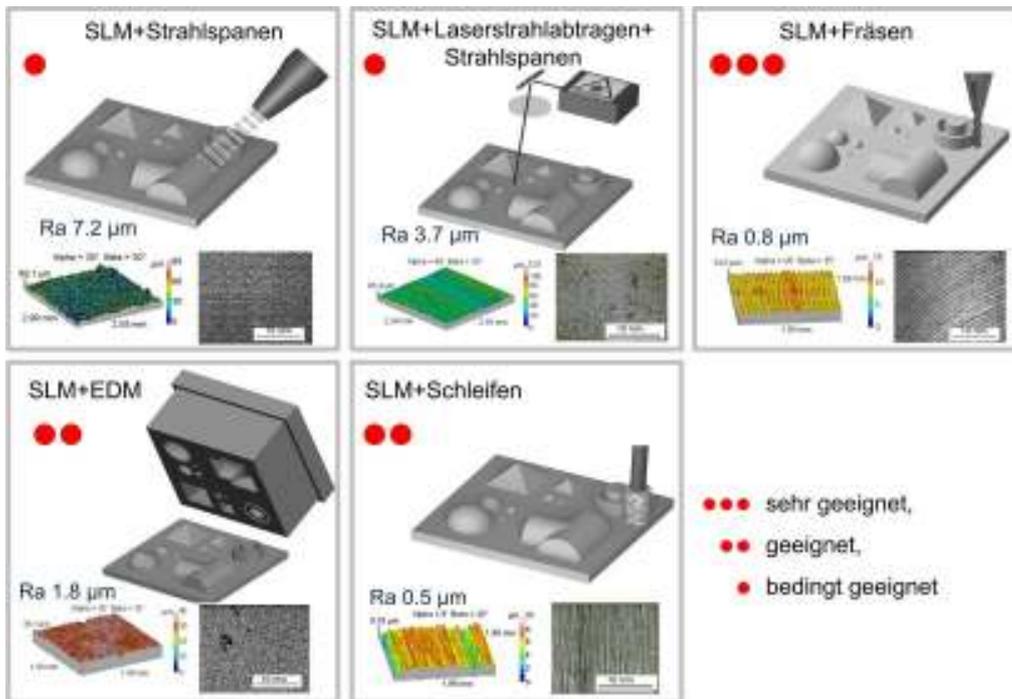


Bild 7 – Postprozesse für die generativ hergestellten metallischen Bauteile

Diese Ergebnisse weisen darauf hin, dass mit dem momentanen Stand der Entwicklung, die generativen Verfahren nur dort zur Anwendung geeignet sind, wo konventionelle Verfahren nicht genutzt werden können.

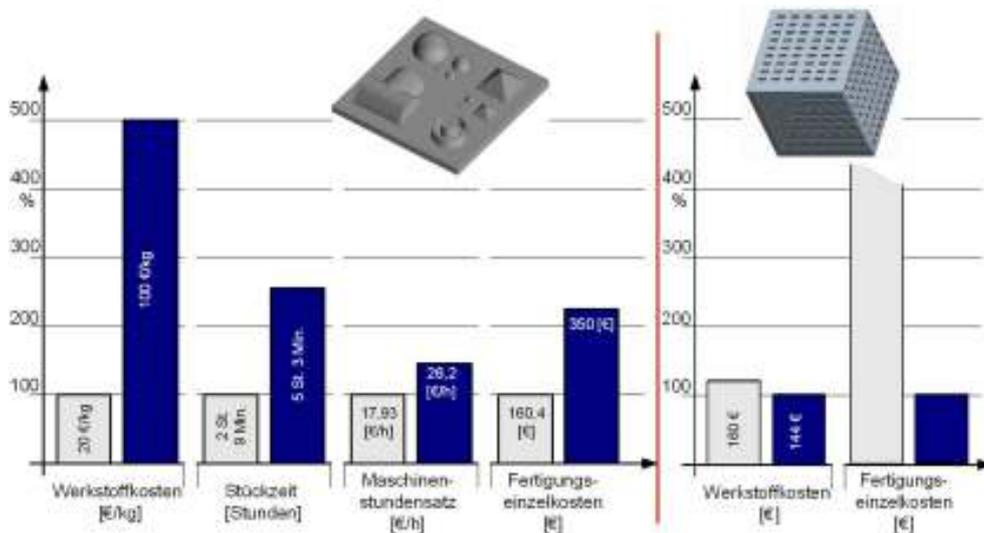


Bild 8 – Wirtschaftlichkeit generativer Verfahren

Zusammenfassung

Generative Verfahren werden für die Bauteile dann angewendet, wenn die Herstellung durch die konventionellen Verfahren nicht wirtschaftlich

durchzuführen ist, also, wo die Bauteilkomplexität hoch und die Stückzahl niedrig ist. Eine breite Anwendung der generativen Verfahren zur Herstellung metallischer Endprodukte hängt wesentlich davon ab, ob es gelingt, die Eigenschaften der generativen Produkte zu verbessern, die Werkstoffpalette zu erweitern und neue Anwendungsbereiche zu erschließen. Außerdem soll die Schaffung einer Struktur zur Fertigungsvorbereitung und -steuerung in Bezug auf die Anwendung generativer Verfahren, eine erfolgreiche Herstellung metallischer Endprodukte unterstützen. Die Potenziale zur Verbesserung der Bauteilqualität sowohl im Prozess selbst, als auch durch die Auswahl der Geometrie angepasster Prozessketten existieren und sind noch nicht ausgeschöpft. Die Informationsbereitstellung, auch durch die Entwicklung solcher im Artikel beschriebenen Entscheidungsmethodiken, trägt zur Anwendung der generativen Verfahren bei.

Literatur: 1. Eisen, M., Witt, G.: Selective Laser Melting -Bauteile aus Materialien nach Kundenwunsch. In: RTEjournal - Forum für Rapid Technologie, 4. Ausgabe, 4(2007), Mai 2007, URL: <http://www.rtejournal.de/> 2. Klare, M., Lindner, F.: Rapid Manufacturing in der Medizintechnik – Neue Verfahrens- und Materialkonzepte. In: RTEjournal - Forum für Rapid Technologie, 4. Ausgabe, 4(2007), Mai 2007, URL: <http://www.rtejournal.de/> 3. Aumund-Koop, C.; Petrozold.; Uckermann, I.: Rapid Manufacturing – am Markt umgesetzte Verfahren und Prozessketten, in: Pulvermetallurgie in Wissenschaft und Praxis, Kollaska H. (Hrsg.) Bd.24, 2008, 181-196 4. Wohlers, T.: The Future of Rapid and Custom Manufacturing, Rapid & Mass Customization 2008, 's-Hertogenbosch, Netherlands 5. Kushnarenko, O.: Entscheidungsmethodik zur Anwendung generativer Verfahren für die Herstellung metallischen Endprodukte. Magdeburg, Univ., Diss., Shaker Verlag, 2009 6. Gebhard, A.: [Generative Fertigungsverfahren : Rapid Prototyping - Rapid Tooling - Rapid Manufacturing](#). 3. Aufl. [München: Hanser, 2007](#) 7. Schoop, C.: Erarbeitung eines Kataloges zur Klassifizierung von LOM-Bauteilen. Magdeburg, Dipl.-Arb., 1997 8. Zaeh, M. F.; Kahnert, M.: The effect of scanning strategies on electron beam sintering. In Production Engineering. Volume 3, Number 3/September 2009, pp. 217-224 9. Castillo, L.: Study about the rapid manufacturing of complex parts of stainless steel and titanium. TNO report with the collaboration of AIMME. TNO 2005. 31 p. 10. Kruth, J.-P., Vandenbroucke, B., Van Vaerenbergh, J., Mercelis, P.: Benchmarking of different SLS/SLM processes as Rapid Manufacturing Techniques. Division PMA, Department of Mechanical Engineering, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium Int. Conf. Polymers & Moulds Innovations (PMI), Gent, Belgium, April 20-23, 2005 11. Skrynecki, N.: Optimierung der Strahlschmelztechnologie für die Anwendung im Werkzeug- und Formenbau am Beispiel des Anlagenkonzepts „MCP-Realizer II SLM“. Dipl.-Arb., 2006 Universität Duisburg-Essen 12. Yasa, C.; Craeghs, T.; Badrossymay, M.; Kruth, P.-J.: Rapid Manufacturing Research an the Catholic University of Leuven, US-Turkey Workshop on Rapid Technologies, September 24, 2009, pp. 63-73.

C. CONSTANTINESCU, E. WESTKÄMPER, Stuttgart, Germany

FLOW-BASED APPROACH FOR HOLISTIC FACTORY ENGINEERING AND DESIGN

The engineering of future factories requires digital tools along life cycle phases from investment planning to ramp-up. Manufacturers need scientific-based integrated highly-dynamic data management systems for the participative and integrated factory planning. The paper presents a new approach for the continuously integrated product design, factory and process planning, through a service-oriented architecture for the implementation of digital factory tools. A first prototype of the digital factory framework has been realised by a comprehensive scenario for factory, equipment and process planning. The phases of factory operation and equipment maintenance are integrated, as well. The enabling technologies, grid computing and workflow management, which supports the comprehensive and integrated engineering of products, factory and processes are shortly introduced.

Keywords:

Digital factory, Workflow management, Grid engineering

1 CHALLENGES

Factories are complex and long life products, which have to be permanently adapted for changing products, markets and technologies to fulfil the economic and ecologic requirements. The environment of manufacturing is turbulent and paradigms change from cost optimisation towards sustainability and competitiveness in a global economy [1].

There are many and diverse transformability drivers which trigger the adaptation of factories and processes. This process includes the whole structure from networks and supply chains to sites infrastructure, manufacturing systems, machines, workplaces and processes. The time scales of all operations, which may change factories systems, reach from short to long-term [2]. The planning processes are multi-scale (space and time) processes, for which engineers and planners need efficient tools (Digital Factory). They should support all processes from the strategic planning of resources down to the parameters and execution instructions or programmes.

This paper presents a Reference Model for holistic Factory Engineering based on state-of-the-art Grid technology and Workflow Management Systems. The developed IT architecture is introduced through a system overview and an example scenario.

on the effects of product structure on the network set-up by approaching regional aspects like local know-how. In the middle stays the logistics focused on Just-In-Time principle, supported by various material flow planning and optimisation tools. The planning of buildings and infrastructure, of logistic connection to the traffic system, of media supply and of wastage disposal follow the classical methodology enhanced by sustainability aspects and new features as Corporate Identity, communication and motivation of employee in innovative working spaces. The planning of internal logistics and layout, supported by a large amount of systems aims at permanently adaption and optimisation of the space floor utilisation. The connection and synchronisation of all structure planning tools to the central factory data is achieved through simultaneous engineering, participative and collaborative technologies and tools.

The *planning of processes, machines and equipment* follows the changes of product world focusing on production resources like machines, tools, fixtures, work places and CNC programs for controlling of machines and equipment. These planning activities range from medium to short terms. The advanced Industrial Engineering methods and tools support the work planning regarding the material, processes, work sequences, used equipment and measurement tasks by having a relevant contribution to the synergetic optimisation of time, costs and quality.

The *planning of operation and usage* of factories starts with ramp-up and implementation, continues with factory operation and ends with maintenance and dismantling or replanning, by ranging on short time periods as weeks, days, and hours. The integration of Manufacturing Execution Systems and maintenance systems into the Factory Data Model and Management supports the synchronisation of the Digital Factory with the factory operation [6]. Innovative use of sensors and RFID technology enable the implementation of the Smart Factory through the so-called factory context-aware systems, e.g. failure management systems. The data, knowledge and best practices acquired in the phase of factory operation and maintenance represent a valuable base of learning for permanently adaptation and optimisation of factories.

As along all these planning phases are involved many organisations and are employed a large variety of IT systems and tools, the challenge of a central Factory Data Model and the corresponding Data Management arises. In analogy with the Product Data Management Systems, in the centre of the approach is the Factory Data Management, responsible for the project management, for the communication and the integration of the required IT systems and tools. It supports the data consistency and the workflow functionalities specific to the factory planning processes.

Approaches the Factory modelling and simulation and its levels as follows: Factory structures (sites, network, manufacturing segment/area, system, processes); Areas and concepts (economic science, engineering, mathematics, physics, chemistry); Modelling and simulation methods (event-oriented simulation, finite elements, molecular dynamics); Spatial expansion (macroscopically or mesoscopically, microscopically, atomically); and Temporal expansion (years or weeks, days, hours, seconds, nanoseconds) [8]. This comprehensive modelling and simulation at all these scales brings the complexity consisting on migration of simulation models from numeric simulation for the process and material modelling towards the discrete simulation for the purposes of logistics simulation. The following Sections present a possible solution to these challenges.

3 ENABLING TECHNOLOGIES

This chapter introduces the main functionalities of Grid Computing and also Workflow Systems. These technologies found the base for the Grid Engineering Architecture and the integrated scenario, presented in Chapter 4.

3.1 Grid Computing

A computational grid is a hardware and software infrastructure that provides dependable, consistent, pervasive, and inexpensive access to high-end computational capabilities' [9].

The main challenge for a Grid is an architecture which enables the cross-organisational application integration and resource sharing - virtualisation.

To effectively operate between any participants in a virtual organisation, interoperability is the central challenge to be addressed which means common and standardised protocols. Hence, the architecture of a Grid is mainly a protocol architecture, which defines data exchange standards for the basic mechanisms by which users of virtual organisations can share computers, software, data and other resources [10]. The most famous organisation for the standardization of Grid Middleware which specifies these protocols and founds the base for a Grid Architecture is the Global Grid Forum (GGF). The main goal of this organization is the development of the Open Grid Service Architecture (OGSA).

Grid Computing can be applied in different ways and can be categorised according to Berstis [11] by the following types:

Computation: Computational Grids are used to run complex simulations, calculations or any jobs on different distributed computers in order to decrease the total execution time. There are two possibilities to run a simulation in Grid environments [12]:

- The application is implemented modular, that it can be executed on different processors in parallel.
- The application runs several times on different processors, for example the automated optimisation of a simulation.

Grid is not only the sharing of computing resources but it also contains all the functionalities to manage the life cycle of computing jobs: for example the handling of the storage of large datasets and the arranging of the data exchange required for the job execution [13].

Data Storage: A common file system in a Data Grid can provide a single uniform namespace for data [9]. The users can reference these data, not concerning where they are stored in the Grid. Thus large data capacity sometimes required for complex simulations and calculations can be partitioned over many machines and an immense overall data capacity is available.

Communication: To send jobs to different computers, it is required to provide the input data for the job and to collect the output data resulted from the job. Grid Computing provides technologies to simplify this process, for example through workflow systems, and it also supports the efficient transmission of large data capacities.

According to these technologies and based on OGSA the Globus Toolkit was developed by the Globus Alliance [14].

3.2 Workflow Management

Factories have to be flexible and transformable, in order to remain sustainable and competitive. Therefore permanent planning processes are required, which have to be performed as fast as possible. For a systematic engineering of factories, equipment and processes, modern tools of the digital factory are employed. The planning goals and planning processes are however always situation-based. The main reason for that is the plurality of different transformability drivers like changes of the products, increasing cost pressure and fluctuating demands on the market.

In order to achieve maximum of effectiveness and efficiency during the situation-based planning processes many planning activities have to be standardised. The possible solution to cope with this challenge is the situation-based factory, equipment and process planning implemented by using Workflow Management Systems. These type of systems represent a kind of middleware systems, which are application-independent and support the modeling, the enactment and the monitoring of workflows [15].

The Workflow Reference Model, developed by the Workflow Management Coalition describes the interfaces of a workflow management

system. According to [16], the model defines the interfaces of the workflow enactment service to the following subsystems:

- process definition tools,
- workflow client applications,
- invoked applications,
- other workflow enactment services and
- administration and monitoring tools.

The enactment service provides the runtime environment for the progress of the processes.

In the context of a workflow management system, the modelling of workflows is usually performed through a graph-based process definition interface. Generally, the specification of the workflows is described by the Business Process Execution Language - BPEL, which is an XML-based description language. It uses web services for interactions with external applications [17].

The state-of-the-art Product Life Cycle Management Systems offer functionalities of workflows by supporting the management of all relevant data regarding the product development and factory engineering [18, 19]. The workflow management systems also provide huge potentials for the improvement of factory and process planning by embedding principles coming from simultaneous engineering and participative planning into the engineering process. The modelling of workflows before a planning project starts enables a maximum of coordination of planning activities. The communication between planners, which is dependent on the modelled workflow as well, is supported by task lists. The outcome of this is a clear definition of the process flow and of the work content, and their allocation to the persons which are involved in the planning project. A cooperation within and across departments with a clear allocation of responsibilities can be achieved. After finishing a task, the enactment of further planning activities can be initiated dependent on the workflow model.

The enormous complexity of planning processes can be handled by using tools, applications and systems like PPS, MRP and CAx. The automated passing of data, information and related documents supports the comprehensive use of digital engineering and manufacturing systems. The improved availability of data, the avoiding of data redundancy and the assuring of data consistency are relevant benefits of using that systems. Furthermore, the modelling effort can be considerably minimised based on the automated preparation of data. The integration of digital engineering and manufacturing systems can be performed

by web services. The enactment of those engineering systems by workflow management systems supports their purposeful use in a planning project. A considerable reduction of the planning duration and a significant improvement of the planning quality can be achieved.

Standardised interfaces of the workflow enactment services are available. Thereby an always actual status of the planning project supports the planners' and controllers' activities. For analysing the costs and times, essential tasks of controlling can be supported by the workflow management systems. The implementation of quality gates, which brings together parallel activities to points of decision and where the degree of maturity and existing risks are evaluated, are provided along the planning workflow [5].

Regarding to the situation-based character of planning projects a holistic modelling of the planning workflow, which has to be individually prepared for each planning project, is required. The current states of the factory and the established planning goals have to be considered. For coping this challenge the storing of predefined workflows in a workflow library, which could be allocated to the planning fields of a factory, is conceived and developed. These template workflows can be used for the modelling of the aggregated workflow corresponding to a specific planning project through using a graph-based process definition tool. Furthermore, planning workflows, which are separately enacted by a different workflow enactment service could be coupled and synchronised by the interoperability of workflow engines.

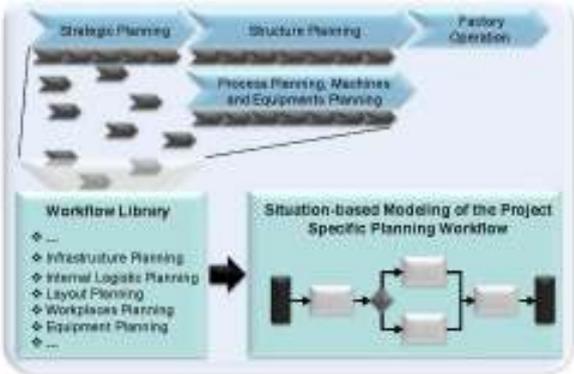


Figure 2 – Approach of the planning method based on workflows.

Figure 2 illustrates the planning methodology. After finishing a planning project, the modelled aggregated workflows can be stored in the library and best practices can be used furthermore by implementing the learning concepts in factory planning. A planning scenario which is performed in an implemented grid-flow-based planning environment is presented in chapter 4.2.

4 APPROACH OVERVIEW AND IMPLEMENTATION

The reference model of a grid-flow-based approach for holistic factory engineering and design was validated by a comprehensive planning scenario. The Grid Engineering for manufacturing lab – GEMLab at Fraunhofer IPA/IFF represents a planning environment which provides the shortly presented enabling technologies for the purposes of systematic, integrated and comprehensive factory, equipment and process planning. In the following chapters, a planning scenario is presented, as well as the integrated digital engineering and manufacturing systems and the way of data integration and data exchange. Firstly, the innovative GEMLab Architecture is over-viewed.

4.1 GEMLab Architecture

A flow-grid-based architecture has been conceived and developed in the Grid Engineering for Manufacturing Laboratory – GEMLab at the Fraunhofer IPA/IFF (Figure 3). It enables dynamical generation of situation-based workflows which can be executed to process a continuous and systematic factory planning.

The used Grid Workflow System manages the orchestration of distributed data, models and planning systems and also computing resources. The different planning systems for product development, factory and process planning are integrated through the service-oriented Grid Engineering Integration Middleware.

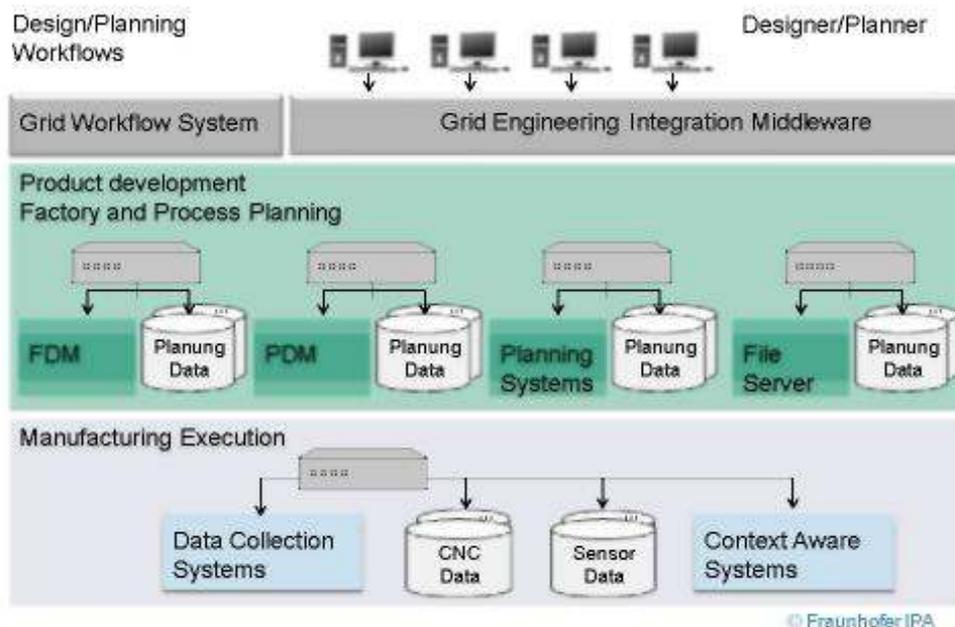


Figure 3 – Grid Engineering Architecture

The central data exchange points for the planning process are the Product Data Management System (PDM) and the Factory Data Management System (FDM). To solve the bridge between product planning and factory planning an automatic change propagation method synchronises these two components. The systems of the manufacturing execution are coupled through the middleware and allow the synchronization of the current factory status and the factory planning. The Grid Engineering Architecture is additionally supported by collaboration systems which enable functionalities like project management, task management and communication. Therewith distributed and interdisciplinary projects can be systematically organized.

Each digital tool is integrated to the Grid Engineering Architecture through a standardised Grid Engineering Service implementation which adapts the heterogeneous systems by different suppliers to a common interface. The WSRF – Web Service Resource Framework standard is used to implement these services and the Globus Toolkit Service Container is extended for the deployment of this services.

The data is exchanged through a specific XML-based format which has been extracted from a factory data reference model. A service library for transformations is used to adapt the output data of the different tools to the common data exchange format. The transformation library uses specific transformation technologies like Extensible Stylesheet Transformation Language - XSLT. The graphical workflow system GridNexus by University of North Carolina in Wilmington is introduced and customised to the requirements of factory and process planning. It provides an intuitive graphical user interface, supports WSRF services and allows the dynamic creation and execution of workflows without time-consuming workflow deployment.

4.2 Implementation Scenario

In order to validate this new approach and to identify its advantages and benefits, a continuous planning scenario was developed. In this scenario a holistic planning and optimisation of a factory, that produces desktop accessories with many variants, shall be considered. For performing the planning tasks the planning environment, which is available in the GEMLab and which consists of different state-of-the-art digital engineering systems will be used. Therewith the potentials of powerful tools can be demonstrated as well as the innovative approach for data exchange in order to achieve an integrated and comprehensive factory, equipment and process planning.

The planning scenario starts with the extension of the spectrum of variants of the scenario's product desktop accessories. There already exist different

modules existing like cans for writing utensils and clocks, which can be commissioned and assembled to customer specific products. The modules shall be enlarged by a desk lamp. The factory consists of a manufacture of parts, cleaning, sub-assembly and a final assembly (Figure 4). The extension of the spectrum of variants requires adjustments in the production processes, in the factory layout and in the internal logistics.

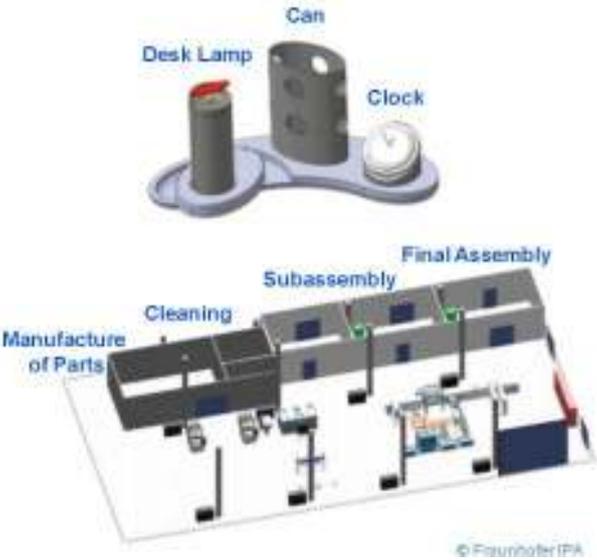


Figure 4 – The product and the factory layout

In the following an overview of the sequence of the planning tasks and the applied planning tools shall be described (Figure. 5)

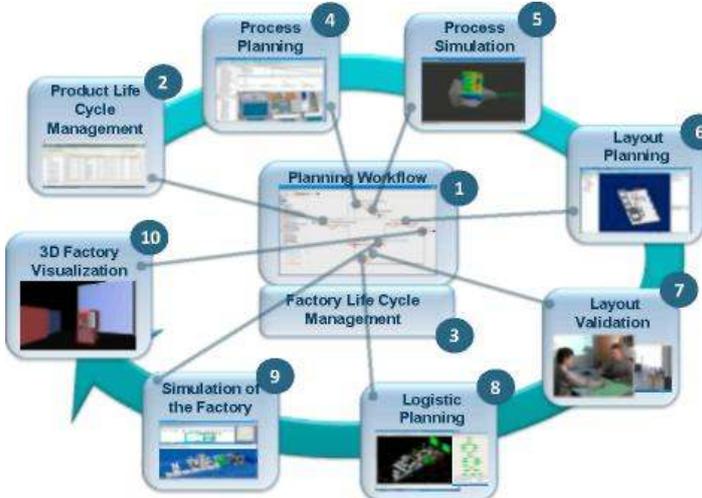


Figure 5 – Workflow of the planning scenario

1. Modelling the Planning Workflow

At first the planning workflow is modelled by the grid-flow system GEMFlow which bases on the open source system Globus Toolkit and GridNexus. These systems support the modelling and enactment of the planning

workflow. Along this workflow the data exchange between the Factory Life Cycle Management (FLM) system Teamcenter from Siemens PLM Software and the other digital tools is performed using Grid Services.

2. Product Life Cycle Management

The data, which were generated during the development of the new product variant, have to be stored in the Product Life Cycle (PLM) system Windchill from Parametric Technology Corporation - PTC. The functions of the PLM system support the planning team to manage the structure of the product, the related CAD data and the documentations. It further supports the development of a generic process plan by combining product and process data.

3. Factory Life Cycle Management

The data, which were generated and stored within the PLM system Windchill, will be passed to a FLM system (Factory Life Cycle Management). As FLM system,

Teamcenter is applied, which was originally developed as a PLM system. It is used for the central management and storage of the data for the products, processes, resources and factory structure. All tools which are applied for the factory, equipment and process planning are coupled with Teamcenter.

4. Process Planning

The generic process plan and the product structure are exchanged between the Product Life Cycle Management and the Process Planning tool over the FLM system. This process plan includes a rough sequence of the manufacturing steps. They have to be adjusted to the given facts of the specific factory. The analysis of the capacity requirements and of the available capacities shows whether an adaption of the capacities in the factory is required or not. The tool Process Designer from Siemens PLM Software supports the allocation of equipments and personal to manufacturing processes and the calculation of times for those processes. It also supports a line balancing for the most efficient association of processes to resources.

5. Process Simulation

Critical processes like the cleaning of complex parts with spray jets have to be investigated by a process simulation tool from Fraunhofer IPA. Therewith the optimal adjustments of the devices like the jet distance, the angle of impact and the duration of impact can be determined as well as the required process times. Therefore distributed simulation optimisation methods are used to improve these adjustment parameters to an optimum. To prepare the optimisation, the CAD data of the product and the adjustment parameters for the cleaning machine are transferred from the FLM system to the simulation tool.

6. Layout Planning

In the process planning phase the requirement for a new assembly resource was identified. For this reason the factory structure was enhanced with a new assembly station using the software Process Designer. Therefore the current factory layout was imported from the FLM system to Process Designer and exported back to the FLM system after the modification.

7. Layout Validation

For the participative validation of the factory layout, the IPA Planning Table was used in this scenario. Experts, coming from different disciplines of factory planning, are enabled to work together on a factory layout by the Planning Table. Thereby the planning is positively influenced by the different points of view of those experts and their implicit knowledge [20]. The Planning Table provides full capability to import the current factory layout from the FLM-system and export it back after the modification.

8. Logistics Planning

The changes of the product cause new logistics processes and connections of the material flow. The current layout is imported from the FLM system and visualised by the CAD system FactoryCAD from Siemens PLM Software. A static optimisation of the factory, supported by the extension FactoryFlow, is performed by statically analysing the different material flows and visualising them in the factory layout.

9. Simulation of the Factory

With the simulation data exchange module SDX from the simulation system Plant Simulation from Siemens PLM Software, a simulation model is automatically generated, based on data coming from process and layout planning. The key performance indicators (KPI), which can be analysed by this simulation, are cycle times of products, capabilities of machines and intensities of material flows. These KPIs provide a good basis of factory optimisation.

10. 3D-Visualisation

At the end of the scenario, the application GEM Factory Immersion from Fraunhofer IPA generates a 3D model of the current factory layout which is stored in the FLM-system. This factory model is projected as a 3D environment for evaluation of interdisciplinary experts using a stereoscopic projection wall.

5 CONCLUSIONS

The paper presents the main results in the field of continuously integrated factory engineering and design through the Reference Model for a holistic Factory Engineering based on state-of-the-art Grid technology and Workflow Management Systems. The developed IT architecture is introduced through system overview and an example scenario is presented.

The innovative integration of digital manufacturing technologies and of the corresponding tools for modelling, simulation, optimisation and visualisation

of factories by following the Life Cycle philosophy gives to the factory the Life Cycle orientation. It supports the synchronisation with the phases and tools of Product Life Cycle Management. The orchestration of Workflow and Grid technologies enables the distribution and networking of manufacturing resources like data, models, engineering systems and computing resources.

REFERENCES: 1. Jovane, F., Westkämper, E., Williams, D., 2009, The Manufuture Road: Towards Competitive and Sustainable High-Adding-Value Manufacturing, Springer Verlag, Berlin. 2. Wiendahl, H.-P., Heger, C. L., 2004, Justifying Changeability. A Methodical Approach to Achieving Cost Effectiveness, International Journal for Manufacturing Science and Production, Volume 6, Nr. 1-2: 33-39. 3. Kettner, H., Schmidt, J., Greim, H.-R., 1984, Leitfaden der systematischen Fabrikplanung, Hanser Verlag, München. 4. Aggteleky, B., 1987, Fabrikplanung, Werkentwicklung und Betriebsrationalisierung, Hanser Verlag, München. 5. Westkämper, E., 2008, Fabrikplanung vom Standort bis zum Prozess, mic - management information center, Fabrikplanung: Planung effizienter und attraktiver Fabriken, 8. Deutscher Fachkongress, Landsberg/Lech, Germany. 6. Westkämper, E., Constantinescu, C., Hummel, V., 2006, New Paradigms in Manufacturing Engineering: Factory Life Cycle, Annals of the Academic Society for Production Engineering, Research and Development, XIII/1: 143-147. 7. Lucke, D., Constantinescu, C., Westkämper E., 2008, Smart Factory - A Step towards the Next Generation of Manufacturing, Manufacturing Systems and Technologies for the New Frontier, Ed. Mitsui-shi, Ueda, Kumura, 41st CIRP Conference on Manufacturing Systems: 115-118. 8. Scheibe, A., Constantinescu, C., Decker, M., Ye, Q., Westkämper, E., 2006, A comprehensive and holistic approach of multi-scale modeling and simulation of manufacturing systems, 6th International Workshop on Emergent Synthesis: 205-211. 9. Foster, I. 2002, What is the Grid? A Three Point Checklist, available at: <http://www.mcs.anl.gov/~itf/Articles/WhatIsTheGrid.pdf>, last accessed : 2009-06-10. 10. Foster, I., Kesselman, C., Tuecke, S., 2001, The Anatomy of the Grid: Enabling Scalable Virtual Organizations, International Journal of Super-computer Application, Volume 15. 11. Berstis, V., 2002, Fundamentals of Grid Computing, IBM, available at: http://www.redbooks.ibm.com/redpapers/pdfs/redp_613.pdf, last accessed: 2009-06-10. 12. Constantinescu, C., Eichelberger, H., Westkämper, E., 2009, Continuously and Integrated Factory and Process Planning – Grid Engineering for Manufacturing, wt Werkstattstechnik online 99-3: 92-98. 13. Schopf, J. M., Berman, F., 2002, Grids: The top ten questions, Scientific Programming, Volume 10: 103-111. 14. Globus Project, 2009, available at: www.globus.org, last accessed: 2009-06-10. 15. Gadatsch, A., 2008, Grundkurs Geschäftsprozess-Management – Prozessunterstützung mit Work-flowmanagement-Systemen, Springer Verlag, Heidelberg. 16. The Workflow Management Coalition Specification, 1999, Workflow Management Coalition Terminology & Glossary, available at: http://www.wfmc.org/standards/docs/TC-1011_term_glossary_v3.pdf, last accessed: 2009-06-10. 17. OASIS, 2007, Web Services Business Process Execution Language Version 2.0, available at: <http://docs.oasis-open.org/wsbpel/2.0/OS/wsbpel-v2.0-OS.pdf>. 18. Windchill®, Content and Process Management Software - To Optimize Product Development, available at: http://www.ptc.com/WCMS/files/56909/en/4528_Windchill_br_EN.pdf, last accessed: 2009-06-10. 19. Teamcenter Express, 2005, Der schnelle Weg zu cPDM, available at: http://www.plm.automation.siemens.com/en_us/Images/4680_tcm53-3245.pdf, last accessed: 2009-06-10. 20. i-plant - The multi-functional integration platform for the planning of production systems, 2004, available at: http://www.i-plant.de/index_en.html, last accessed: 2009-06-10.

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

ПОСТРОЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ МОРФОЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Запропоновано метод побудови інформаційних морфологічних моделей деталей машин, який полягає у розбитті об'єма деталі на скінченні елементи та заміні таких елементів формальними нейронами. Зв'язки між нейронами моделюють механічні зв'язки між скінченними елементами розбиття, а спеціальні перетворення приводять структуру скінченних елементів до структури однієї з відомих нейронних мереж, наприклад, прямого поширення.

Предложен метод построения информационных морфологических моделей деталей машин, состоящий в разбиении объема детали на конечные элементы и замене таких элементов формальными нейронами. Связи между нейронами моделируют механические связи между конечными элементами разбиения, а специальные преобразования приводят структуру конечных элементов к структуре одной из известных нейронных сетей, например, прямого распространения.

The method of information morphological models construction of the cars details, consisting in splitting of a detail volume into final elements and replacement of such elements formal neurons is offered. Communications between neurons model mechanical communications between final elements of splitting, and special transformations lead structure of final elements to structure of one of known neural networks, for example, direct distribution.

Построение эффективных систем управления надежностью технических систем невозможно без разработки адекватных моделей их «поведения» на всех этапах жизненного цикла и, в особенности, на этапе эксплуатации, когда накапливаются повреждения, приводящие в итоге к отказу системы в целом. В технических системах ответственного назначения зачастую применяется резервирование элементов, когда каждый последующий элемент имеет возможность исправить отказ предыдущего, изменяя свою «нагрузку» [1].

Как правило, такой же избыточностью обладают искусственные нейронные сети (НС), продолжающие исправно функционировать при потере некоторой части нейронов и связей между ними. Возможное структурное подобие технических и информационных моделей позволило предложить метод оценки отказоустойчивости сложных систем с помощью топологически подобных им (изоморфных) НС [2 – 4].

К сожалению, у этого метода есть один существенный недостаток: если структура моделируемого объекта не соответствует структуре ни одной из известных НС, то использование этого метода невозможно. Это

обстоятельство накладывает серьезные ограничения на применение метода, т.к. множество вариантов разбиения технических объектов (даже одной детали!) теоретически бесконечно, а количество вариантов структур существующих НС невелико [5].

Особенные трудности возникают при искусственной дискретизации объекта моделирования, например, на конечные элементы, т.к. в этом случае получающаяся структура чаще всего 3-х мерная, а известных 3-х мерных нейронных сетей не существует.

В работе предлагается метод увязки структуры объекта, получающегося в результате дискретизации на элементы, располагающиеся вдоль ортогональных осей со структурой многослойных неполносвязных НС прямого распространения.

На рис. 1, *а* для двухмерного случая показан пример условного разбиения некоторого объекта на $3 \times 3 = 9$ элементов, связанных между собой по линиям, совпадающим с ортогональной двухмерной сеткой, проходящей через их центр.

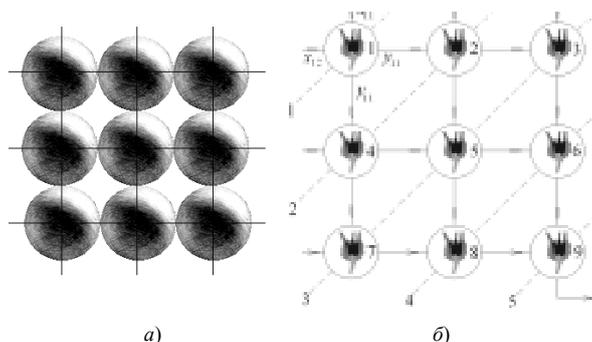


Рисунок 1 – Схема разбиения двухмерного объекта

Расположим нейроны в узлах такой же сетки (рис. 1, *б*) и обозначим связи между ними, причем направленность связей выберем слева направо и сверху вниз. Далее через центры узлов решетки проведем наклонные линии (пунктирные линии на рис. 1, *б*).

Если нейрон 1 считать входным, а нейрон 9 – выходным, то каждая такая линия представляет отдельный слой НС, что наглядно видно на рис. 2. Здесь для наглядности добавлен распределительный слой, который собирает информацию, поступающую на вход НС и перенаправляет ее к первому нейрону. Таким образом «неудобная» для исследования НС (рис. 1, *а*) превращается в обычную шестислойную неполносвязную НС прямого распространения, которая, как известно, может быть использована для решения задач классификации или прогнозирования временных трендов.

Переходя по аналогии с рассмотренным примером к трехмерной дискретизации (рис. 3, *а*), получим трехмерную сетку нейронов (рис. 3, *б*), направление связей между которыми в этом случае выбраны слева направо, сверху вниз и спереди назад.

«Повернем» сетку так, чтобы вертикальная ось проходила через центры узлов 1 и 27, и получим опять многослойную неполносвязную НС прямого распространения (рис. 4).

Количество слоев топологически подобной НС, включая распределительный слой, может быть определено по формуле

$$S = (\delta_1 + \dots + \delta_N) - (N - 1), \quad (1)$$

где N – размерность пространства; δ_i – количество слоев вдоль соответствующей оси ($i = 1 \dots N$).

При $\delta_1 = \delta = \dots = \delta_N$ имеем

$$S = N(\delta - 1) + 1. \quad (2)$$

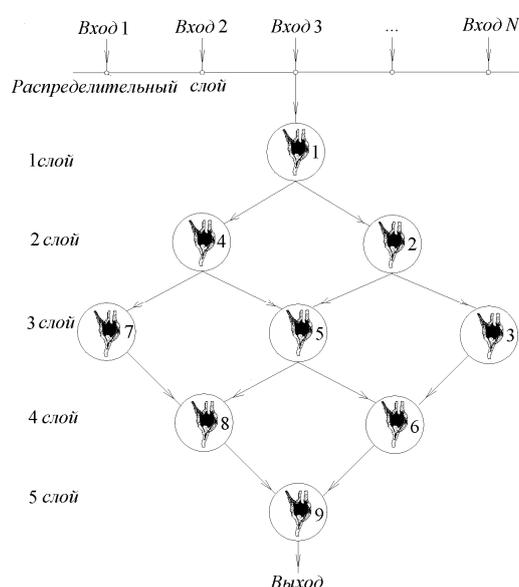


Рисунок 2 – Шестислойная неполносвязная НС прямого распространения

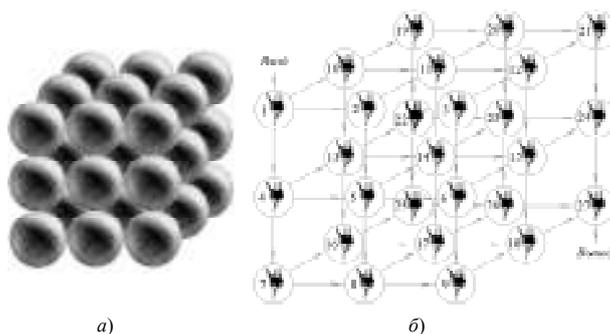


Рисунок 3 – Схема трехмерной модели (а) и ее дискретизация (б)

Такой подход позволяет построить информационные морфологические модели деталей машин практически любой конфигурации. Морфологическая модель позволяет различать четыре типа отказоустойчивости объектов. Первый тип по своим показателям соответствует абсолютно неотказоустойчивой системе, первое же любое повреждение любого элемента (или связи) которой обязательно приводит к отказу.

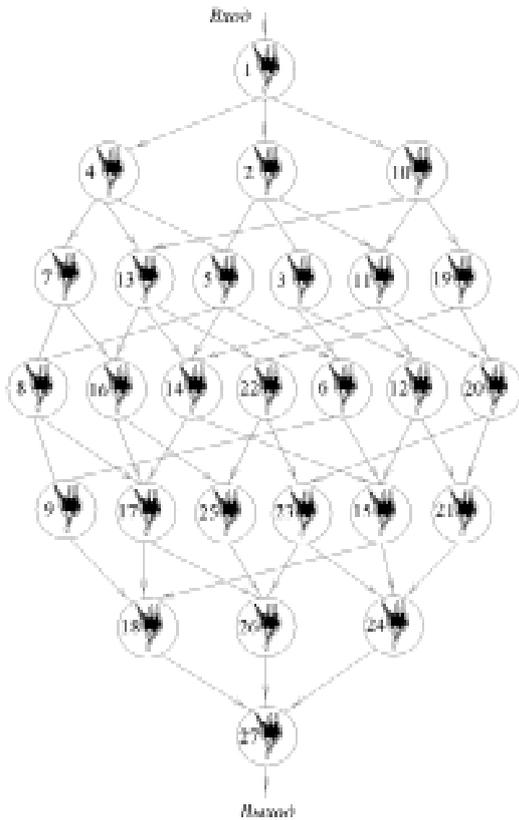


Рис. 4 – Схема многослойной неполносвязной НС

Наконец, для четвертого типа отказоустойчивости в качестве критерия последней рекомендуется произведение выражений (3) и (4):

$$K_4 = K_2 \cdot K_3 = -\log_2 n_1 \cdot \sum_{i=n_1+1}^{n_2-1} \log_2 p_i . \quad (5)$$

Таким образом, предложены логарифмические и энтропийные модели отказоустойчивости сложных технических и информационных систем.

Список литературы: 1. Оборский Г.А. Построение эффективных систем управления надежностью сложных технических систем // Труды Одесского политехнического университета. – 2000. – Вып. 1. – С. 17 – 19. 2. Становский А.Л. Исследование корреляционной связи между отказами топологически подобных технических и интеллектуальных систем / А.Л. Становский, С.Н. Красножон, О.Е. Плачинда // Труды Одесского национального политехнического университета. – 2005. – Спецвыпуск. – С. 88 – 91. 3. Красножон С.М. Прогнозування надійності механічних конструкцій з регулярною структурою / С.М. Красножон, О.Є. Плачинда, О.Л. Становський // Аграрний вісник Причорномор'я. Технічні науки. – 2005. – Вип. 28. – С. 140 – 146. 4. Становский А.Л. Моделирование отказоустойчивости в САПР сложных технических систем / А.Л. Становский В.М. Тонконогий, О.С. Савельева, О.Е. Плачинда // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – 2007. – Вып. 73. – С. 133 – 138. 5. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс. // М.: Вильямс, 2006. – 1104 с.

Второй тип соответствует системе с сомнительной отказоустойчивостью, так как первое же любое повреждение может привести к отказу. Используем для критерия отказоустойчивости в системах второго типа логарифмический показатель вида:

$$K_2 = - \sum_{i=n_1+1}^{n_2-1} \log_2 p_i . \quad (3)$$

Третий тип отказоустойчивости также является сомнительным с точки зрения эксплуатационной надежности системы, поскольку после некоторого количества повреждений вероятность отказа скачком превращается из 0 в 1. Он позволяет ввести в практику оценки отказоустойчивости следующий логарифмический критерий:

$$K_3 = \log_2 n_1 . \quad (4)$$

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ЛЕЗВИЙНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ ИЗ ПСТМ АЛМАЗНЫМ ШЛИФОВАНИЕМ

Розглянуті деякі питання, пов'язані з можливістю підвищення ефективності процесу формоутворення лезових інструментів з полікристалічних надтвердих матеріалів алмазним шліфуванням.

Рассмотрены некоторые вопросы, связанные с возможностью повышения эффективности процесса формообразования лезвийных инструментов из поликристаллических сверхтвердых материалов алмазным шлифованием.

Some questions related to possibility of increase the efficiency of the formation process of lathe instruments made of polycrystalline superhard materials by means of diamond grinding are considered.

1. Постановка проблемы. По данным многих исследователей ([3, 7, 17] и др.) одним из наиболее перспективных методов формообразования лезвийных инструментов и др. изделий из поликристаллических сверхтвердых материалов (ПСТМ) в настоящее время остается шлифование кругами на основе шлифпорошков алмаза. Его эффективность остается существенной даже применительно к черновым стадиям обработки т.к. значения производительности процесса и расхода кругов имеют приемлемые значения. Однако с позиции экономии самих ПСТМ этот метод, конечно же, не совершенен.

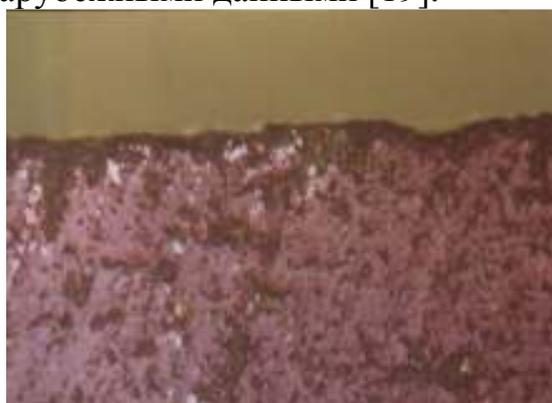
2. Анализ последних исследований и публикаций. До настоящего времени проблема повышения эффективности процесса алмазного шлифования ПСТМ является открытой по причине недостаточной изученности некоторых его особенностей [4, 14, 17]. Анализ литературных источников показал, что качество заточки лезвийных инструментов из поликристаллических сверхтвердых материалов оценивалось в основном только шероховатостью их рабочих поверхностей и кромок, а также радиусом округления последних [3, 4, 8, 12, 13, 14, 17]. Системные же исследования по образованию сколов на режущих кромках при этом практически отсутствуют, несмотря на то, что в нормативно-технической документации они регламентируются [2, 6, 1].

3. Цель исследования. Целью настоящей работы является установление некоторых особенностей, процесса алмазного шлифования

ПСТМ, связанных с необходимостью повышения его эффективности в условиях получения высокого качества обработки.

4. Основные материалы исследования.

По данным работы [16] даже в случае обработки природного алмаза свободным абразивом на чугунных дисках при условии преобладания механического воздействия трудно получить хорошее качество обработанной поверхности и острое лезвие по причине образования больших сколов, форма которых зависит от направления обработки. Эта проблема актуальна и для инструментов из синтетического алмаза. Характерное состояние режущих кромок лезвийных инструментов из синтетического алмаза после черного шлифования представлено на рис. 1 а. Еще одной существенной проблемой является образование трещин на их рабочих поверхностях (рис. 1 б). Ее наличие подтверждается и зарубежными данными [19].



а)



б)

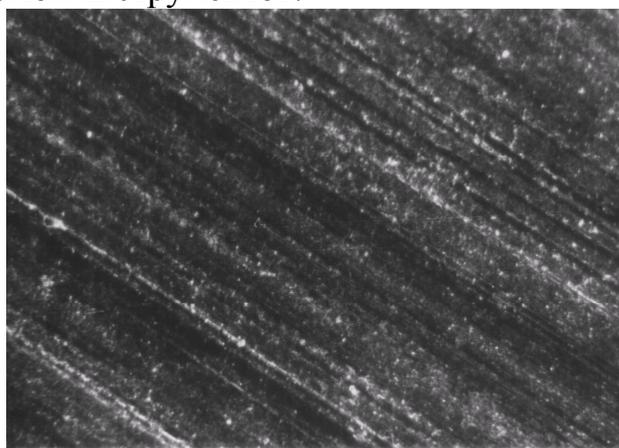
Рисунок 1 – Состояние режущей кромки (а) лезвийного инструмента из алмаза и его рабочей поверхности (б) после черного шлифования (50^X)

Имеется определенная взаимосвязь между трещинами на рабочих поверхностях лезвийных инструментов из ПСТМ и сколами на их режущих кромках. Она заключается в том, что в местах выхода трещины на кромку, как правило, образуется скол. Причем это событие может наступать даже при достаточно щадящих режимах обработки.

Интенсивность трещинообразования зависит от способа и условий шлифования. Это факт может быть объяснен наличием в составе поликристалла фаз, обладающих резко различными физикомеханическими свойствами и в первую очередь коэффициентом линейного расширения, действие которого не может не проявиться в условиях высокой силовой и тепловой напряженности традиционных процессов шлифования. В тоже время процесс сколообразования на режущих кромках существенно зависит от хрупкости обрабатываемого материала.

В этом случае наиболее уязвимыми будут ПСТМ на основе алмаза, которые с одной стороны обладают максимальной хрупкостью, а с другой

стороны по причине их чрезвычайно высокой микротвердости при их обработке возникают наибольшие усилия резания и температуры в зоне шлифования. Поэтому можно считать, что решение задачи устранения сколообразования кромки при обработке ПСТМ на основе алмаза автоматически влечет за собой решение ее применительно к обработке ПСТМ на основе нитрида бора. Однако это не относится к шероховатости рабочих поверхностей. У ПСТМ на основе алмаза она значительно меньше (при одинаковых условиях обработки) нежели у поликристаллов на основе нитрида бора. Одним из объяснений этого факта можно считать то, что ПСТМ на основе КНБ имеют по сравнению с алмазом меньшие значения микротвердости (до двух раз) и абразивной способности (до четырех раз [15]), а, следовательно, механизм съема припуска с этих материалов несколько иной по сравнению с обработкой алмаза. В первую очередь это проявляется в наличии некоторого внедрения алмазных зерен в КНБ, о чем свидетельствуют риски от следов зерен на обработанной поверхности (см. рис 2 а). Поэтому вопрос выбора характеристики круга для этих материалов так остро не стоит и для их черновой обработки можно рекомендовать стандартные круги на основе шлифпорошков алмаза пониженной зернистости ($Z = 50/40 - 80/63$), что позволяет обеспечивать приемлемое сочетание значений таких выходных показателей, как производительность обработки и удельный расход алмазов при одновременном достижении хорошего состояния режущих кромок инструментов.



а) – Гексанит-Р



б) – СКМ-Р

Рисунок 2 – Обработанная поверхность ПСТМ (50^X)

Величина сколов на режущих кромках существенно зависит от марки самого обрабатываемого синтетического алмаза. Здесь сказывается влияние структуры ПСТМ. Так, например, поликристаллы АСБ, имеющие более крупнокристаллическую структуру, сильнее подвержены сколообразованию нежели АСПК. С учетом повышенной хрупкости

ПСТМ (и в особенности на основе алмаза) очень важна роль угла заострения режущего клина β в вопросе сколообразования кромок. Чем больше угол заострения β , тем меньше должна быть величина ν . Этот факт нашел свое экспериментальное подтверждение и согласуется с данными, полученными в работе [17] применительно к доводке алмазов на чугунных дисках, шаржированных алмазным микропорошком. В ней в частности отмечается, что для уменьшения вероятности образования сколов особое внимание следует обращать на выбор марки материала чугунного диска, зернистость микропорошка и угол заострения лезвия, величина которого должна находиться в пределах $\beta \approx 80^\circ - 105^\circ$.

Одна из особенностей процесса формообразования лезвийных инструментов из ПСТМ состоит в том, что улучшение состояния их режущих кромок не может быть достигнуто только лишь за счет уменьшения шероховатости передней и задней поверхностей с учетом хрупкого характера разрушения этих материалов [7]. Так, например, у инструментов из таких менее хрупких ПСТМ как КНБ качество режущих кромок лезвийных инструментов существенно лучше (при сопоставимых условиях обработки) нежели у алмазных инструментов. Это в первую очередь проявляется в меньших размерах сколов на режущих кромках.

Известно, что наряду со сколами на режущих кромках определенные требования к лезвийным инструментам из ПСТМ предъявляются и по точности выполнения геометрии их рабочей части. В этой связи еще одним существенным недостатком высокосилового процесса шлифования ПСТМ следует считать возможность образования, так называемых «завалов» режущих кромок, которые можно классифицировать как отклонение формы (отклонение от прямолинейности Δ см. рис. 3 а).

Это явление характерно, как правило, для случаев недостаточной жесткости системы СПИЗ, одним из слабых элементов которой может являться алмазный круг. По данным работы [10] стандартные алмазные круги применительно к обработке обычных инструментальных материалов, как правило, имеют достаточную жесткость. Однако это не всегда справедливо для случая шлифования ПСТМ, когда давление в контакте (при работе по жесткой схеме [5]) как минимум на порядок выше, чем при шлифовании, например, твердого сплава [9]. Поэтому при изменении площади контакта ПСТМ с рабочей поверхностью круга (РПК) на входе и выходе возникает неравномерность контактного давления по ширине РПК (даже при работе без полного выхода ПСТМ за пределы РПК), а это приводит к изменению интенсивности линейного съема материала ПСТМ (рис. 3 б). Ширина участка РПК B_D , в пределах которой давление $P = const$ зависит от общей ширины РПК и размера ПСТМ. Устранение указанного выше отклонения формы может быть

осуществлено, например, путем выхаживания. Однако это требует существенных затрат времени, поскольку в данном случае в особой мере проявляется эффект технологической наследственности [11] (по причине высокой силовой нагруженности в зоне обработки и недостаточной жесткости системы СПИЗ).

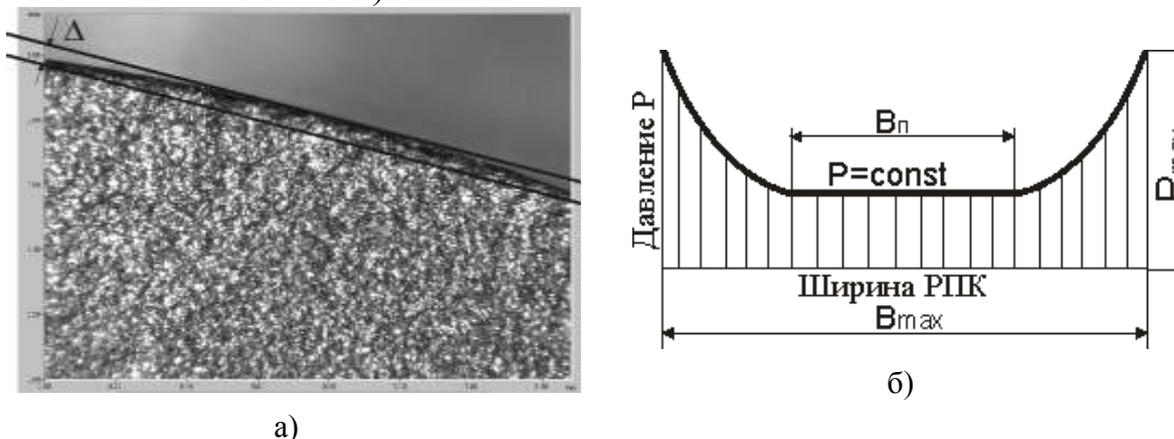


Рисунок 3 – Отклонение режущей кромки от прямолинейности (а) и схема изменения давления в контакте по ширине РПК (б)

Для ответа на вопрос о том, каким образом целесообразно выводить сколы – по передней или задним поверхностям с точки зрения минимизации съема ПСТМ, необходимо в первую очередь учитывать размеры рабочих поверхностей инструментов. Сказанное можно проиллюстрировать примером, представленным на рисунке 4 (здесь а) - $h = 0.75 \text{ мм}$; б) - $h = 1.125 \text{ мм}$; в) - $h = 1.5 \text{ мм}$). На нем для достаточно распространенного реза из АСПК (диаметр заготовки ПСТМ $\varnothing 4,5 \text{ мм}$) приведены величины снимаемого объема ПСТМ в случае выведения скола одной и той же величины путем обработки по передней и задним поверхностям (здесь величина припуска соответствует размеру скола режущей кромки). При этом предполагается, что сколы одинаковой величины имеются на обеих кромках, поскольку при наличии скола только на одной кромке преимущество за доводкой по задним поверхностям, как правило, однозначно. Эти данные свидетельствуют о том, что в диапазоне малых величин площадей передней поверхности (площадь косвенно оценивалась глубиной h лыски, образованной на ПСТМ при заточке передней поверхности) с точки зрения снимаемого объема, а, следовательно, трудоемкости процесса наиболее предпочтительна обработка по передней поверхности. Затем, начиная с определенной величины площади (для АСПК, например, при глубине $h \approx 1,13 \text{ мм}$), оба варианта становятся практически равноценными, а затем более предпочтительным будет вариант, предусматривающий обработку по двум задним поверхностям одновременно.

В случае, когда величина сколов на режущих кромках не превышает допустимое значение ($v \leq v_{дон.}$ [12]) и припуски, снимаемые с инструмента по передней и задней поверхностям малы ($\Delta h \approx v$ мм), роль таких факторов как Δh , v и $\Delta\alpha$ ($\Delta\alpha = \alpha_{зат} - \alpha_{черт}$, чистовая заточка производится по ленточке) становятся примерно равнозначными ввиду малости удаляемых объемов ПСТМ. Состояние режущих кромок лезвийных инструментов из ПСТМ может коренным образом изменить выходные показатели обработки.

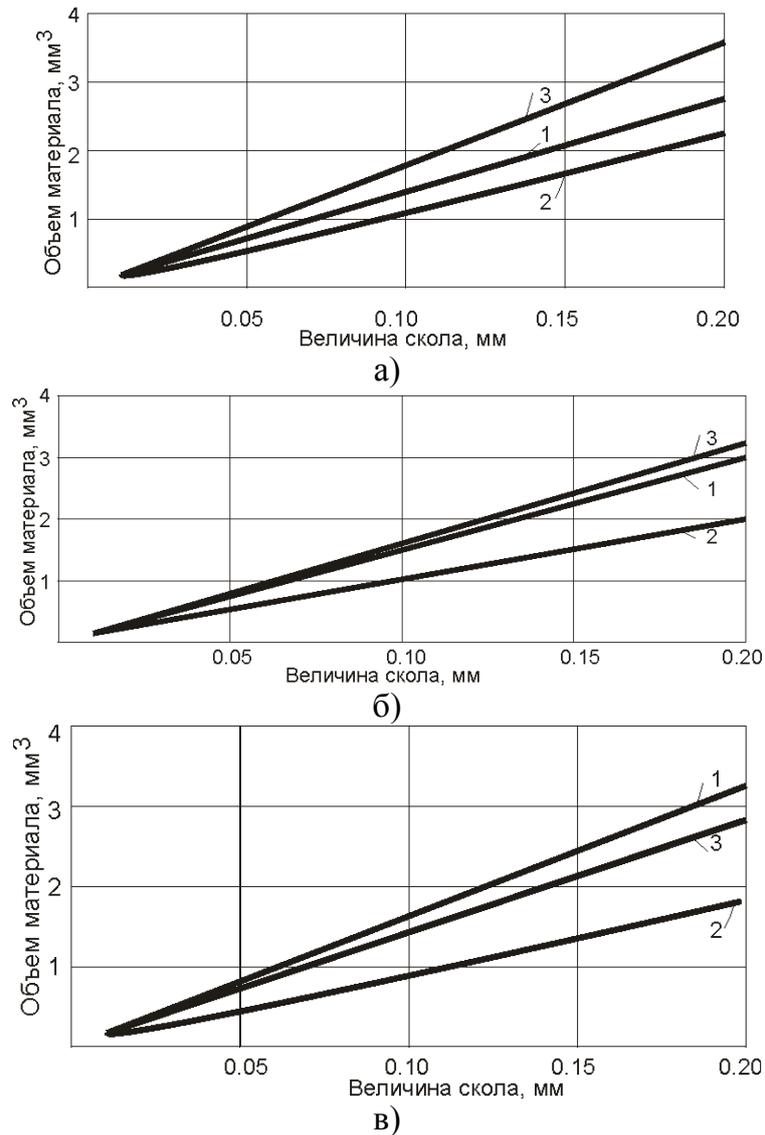


Рисунок 4 – Зависимости объема снятого материала от величины припуска по передней, главной задней и двум задним одновременно поверхностям ($\gamma = 0^\circ$; $\varphi = 45^\circ$; $\varphi_1 = 15^\circ$; $\alpha = \alpha_1 = 11^\circ$; $\Delta\alpha = \Delta\alpha_1 = 0^\circ$) при заточке: 1-по передней поверхности; 2-по главной задней поверхности; 3-по двум задним поверхностям

Они свидетельствуют о том, что уже при величине скола $\nu = 0,1$ мм значение расхода круга на чистовой стадии обработки примерно сравнивается с его величиной на черновой стадии, а основное время практически в два раза превышает продолжительность черновой обработки. Это позволяет констатировать тот факт, что существует серьезная проблема повышения эффективности высококачественного формообразования лезвийных инструментов из ПСТМ, которая требует своего научного разрешения.

Сказанное подтверждается и данными зарубежных исследователей, которые отмечают, что дополнительная обработка шлифованием технически очень трудна ввиду чрезвычайно высокой твердости алмаза и в большинстве случаев экономически неэкономична [18].

Таким образом, на основании выполненного анализа можно сделать вывод о том, что с точки зрения минимизации затрат на чистовое шлифование лезвийные инструменты из ПСТМ после черновой стадии обработки не должны иметь дефекты (отклонение от прямолинейности режущих кромок Δ и сколы ν на них), превышающие допустимые значения ($\approx 0,02$ мм [12]). Такой подход позволит существенно повысить эффективность процесса их чистового формообразования.

Список литературы: 1. Бурдун Г.Д. Методы контроля качества алмазного инструмента / Бурдун Г.Д., Суругин В.Ф., Даревский В.Г. - М.: Машиностроение, 1979.- 119с. 2. ГОСТ 13297-86 Резцы и вставки алмазные. Технические условия. Взамен ГОСТ 13288-76, 13289-76, 13294-76, 13295-76, 13297-76; Введ. 01.01.88. - М.: Изд-во стандартов, 1986. - 14 с. 3. Грабченко А. И. Научные основы алмазного шлифования сверхтвердых поликристаллических материалов: дис. в форме научного доклада докт. техн. наук: 05.03.01 / Грабченко Анатолий Иванович. - Харьков, 1995. - 59 с. 4. Грабченко А.И. Расширение технологических возможностей алмазного шлифования / Грабченко А.И. - Харьков: Вища шк., 1985. - 184 с. 5. Грабченко А.И. Особенности контактного взаимодействия алмазных кругов с СТМ при шлифовании / Грабченко А.И., Пыжов И.Н. - В кн.: Контактные процессы при больших пластических

деформациях. - Харьков: Вища школа, 1982. - С. 33-37. **6. Грай К.** Сравнение работоспособности инструмента из гексанида-Р и амборита при точении закаленных сталей / *Грай К, Зубарь В.П* // Резание и инструмент. - 1985. - Вып. 34. - С. 149-151.

7. Доброскок В.Л. Научные основы формирования рабочей поверхности кругов на токопроводных связках в процессе шлифования: дис...докт. техн. наук: 05.03.01 / Доброскок Владимир Ленинмирович. – Харьков: - 2001. - 447 с. **8. Епифанов В.И.** Технология обработки алмазов в бриллианты / *Епифанов В.И., Песина А.Я., Зыков Л.В.* - М.: Высш. шк., 1984. - 319 с. **9. Захаренко И.П.** Алмазные инструменты и процессы обработки / *Захаренко И.П.* - К. :Техніка, 1980. – 215с. **10. Лавріненко В.І.** Шліфувальні круги у верстатній системі: обмеження за критерієм жорсткості / *Лавріненко В.І.* // Сверхтвердые материалы. - 2009. - № 2. – С. 82-87. **11. Маталин А.А.** Технология машиностроения / *Маталин А.А.* - Л.: Машиностроение, 1985. - 496 с. **12. Пыжов И. Н.** К особенностям заточки и доводки рабочих элементов лезвийных инструментов из ПНТМ при алмазном шлифовании / *Пыжов И. Н.* // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні.-Харків: 2007.-№ 01.-С. 18-25.

13. Робочі процеси високих технологій у машинобудуванні: підручник для студентів вищих навчальних закладів / *Грабченко А.І., Верезуб М.В., Внуков Ю.М. та ін.; за редакцією А.І. Грабченка.* - Житомир, ЖДТУ, 2003 р.- 451 с. **14. 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. - 259с. **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. Синтетические алмазы в машиностроении / [Бакуль В.Н., Гинсбург Б.И., Мишинаевский Л.Л. и др.]; под ред. В. Н. Бакуля. - К.: Наукова думка, 1976. - 352 с. **17. Хрульков В.А.** Алмазные инструменты в прецизионном приборостроении / *Хрульков В.А., Головань А.Я, Федотов А. И.* - М.: Машиностроение, 1977. – 223 с. **18. Федорович В.А.** Разработка научных основ и способов практической реализации управления приспособляемостью при алмазном шлифовании сверхтвердых материалов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.03.01 / *Федорович Владимир Алексеевич.* – Харьков: - 2002. – 466 с.****

19. [Hochleistungsbearbeitung von Holz und Holzersatzstoffen mit PKD-Werkzeugen.](http://www.idr-online.com/german/pages/archive/2004_1/12_art/Art_12_01_04.htm)
http://www.idr-online.com/german/pages/archive/2004_1/12_art/Art_12_01_04.htm

20. Uhlmann, E. Diamant-Technologie - CVD-Diamant als Schneidstoff. Industrie Diamanten Rundschau / *Uhlmann, E., Brucher, M.* - 2003. - V. 37. - Nr. 4. - S-340-355.

О.А. РОЗЕНБЕРГ, д-р техн. наук, **Н.В. НОВИКОВ**, д-р техн. наук,
А.Н. КОСЯКОВ, канд. мед. наук, **С.В. СОХАНЬ**, д-р техн. наук,
Н.В. УЛЬЯНЧИЧ, Киев, Украина

ПУТИ СОЗДАНИЯ ЭНДОПРОТЕЗА ТАЗОБЕДРЕННОГО СУСТАВА НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

У статті показано, що основною причиною ускладнень після ендопротезування кульшових суглобів є асептичне розхитування компонентів імплантату через недостатню біосумісність їх матеріалів. Поліпшення ефективності ендопротезу слід очікувати за умови покращення біосумісності його матеріалів, конструкції, яка б істотно зменшувала напруження у кістковій тканині, наближення біомеханічних властивостей імплантату до властивостей останньої. Запропоновано принципово відмінні шляхи застосування біосумісних матеріалів у конструкції ендопротезу.

В статье показано, что основной причиной осложнений после эндопротезирования бедренных суставов есть асептическое расшатывание компонентов имплантата через недостаточную биосовместимость их материалов. Улучшение эффективности эндопротеза следует ожидать при условии улучшения биосовместимости его материалов, конструкции, которая бы существенным образом уменьшала напряжение в костной ткани, приближение биомеханических свойств имплантата к свойствам последней. Предложены принципиально отличные пути применения биосовместимых материалов в конструкции эндопротеза.

In article it is shown that a principal cause of complications after hip joint replacements is aseptic shaking of implant's components because of insufficient biocompatibility of their materials. To improve of efficiency of an endoprosthesis is possible to expect if an improvement of biocompatibility of its materials will be achieved as well as a design which essentially would reduce a strain in an osteal tissue, and an approach of implant's biomechanical properties to properties of one. It is offered essentially excellent ways of application of biocompatible materials in endoprosthesis designs.

Эндопротезирование суставов является эффективным и часто единственным способом восстановления утраченной функции конечности [1]. Статистика разных стран мира свидетельствует, что в среднем ежегодно в протезировании нуждаются 500–1000 больных и травмированных на 1 млн. населения. Потребность в подобных операциях в России составляет более 300 тысяч в год. Более полумиллиона операций полной замены тазобедренного сустава ежегодно успешно выполняется в Северной Америке. Еще больший процент оперируемых в развитых странах Европы –

например, в девятимиллионной Швеции проводится более 10000 операций тотальной замены суставов в год. Указанная статистика прооперированных случаев на общую численность населения дает основания полагать, что ежегодно в нашей стране нуждаются в протезировании 25–40 тысяч больных. На сегодня в Украине выполняется в 10 раз меньше необходимого количества операций замены суставов [1–2], что обусловлено, в том числе, и недостаточным развитием производства качественных отечественных эндопротезов [3].

В силу анатомо-биомеханических особенностей тазобедренного сустава, его повреждения относятся к наиболее сложной патологии опорно-двигательного аппарата, коррекция которой требует глубоких знаний нормы и патологии, высокого хирургического мастерства ортопеда, полноценной реабилитации, умения прогнозировать судьбу оперированного сустава и больного [4].

В связи с расширением показаний к таким операциям у все более сложных больных для тотального эндопротезирования тазобедренного сустава важным является совершенствование конструкций искусственных суставов [5]. К настоящему времени разработан широкий спектр эндопротезов тазобедренного сустава (более 800). Однако не все из них подтвердили свою эффективность. Именно поэтому продолжают интенсивные научные поиски и прикладные разработки, направленные на совершенствование конструкции и материалов имплантатов, а также методов оперативного вмешательства и профилактики послеоперационных осложнений [6–8].

Тем не менее, широкий диапазон применяемых конструкций эндопротезов не позволяет избежать значительного числа осложнений, самым частым из которых является нестабильность (приобретаемая подвижность) компонентов эндопротезов. По нашим и зарубежным данным асептическая нестабильность компонентов эндопротеза тазобедренного сустава при тотальном бесцементном эндопротезировании наблюдается в 5,1% случаев после 5 лет и 5,8% случаев через 10 лет после имплантации, прогрессивно нарастая при увеличении сроков наблюдения [1,9]. Poss et al. подсчитали, что около 1% осложнений после эндопротезирования составляют рецидивирующие вывихи, 5% – глубокое нагноение, 94% – асептическое расшатывание. Н.В. Корнилов с соавт. [10] провели 137 ревизий, в том числе по поводу асептического расшатывания – 59,1%, вывиха – 4,8%, перелома бедренного компонента – 6,4%, полиэтиленового вкладыша – 9,4%; у 19,6% больных эти осложнения встречались в

сочетании. Herberts et al. [11] проанализировали 4664 ревизий, выполненных в клиниках Швеции за 7 лет, и в 73,8% случаев видят их причину в асептическом расшатывании, в 10,5% – в нагноении, в 5,7% – в переломе ножки эндопротеза, в 3,8% – бедренной кости. Таким образом, проблемой номер один после тотального эндопротезирования является асептическое расшатывание компонентов эндопротеза [2].

Обычно эндопротезированный сустав при всех благоприятных условиях функционирует 15-20 лет, после чего, как правило, наступает его расшатывание из-за лизиса и обработки костного ложа, истирания полиэтилена и др. причин. На развитие осложнения может повлиять целый ряд причин, приводящих к ухудшению состояния костной ткани. Несмотря на бурное развитие эндопротезирования тазобедренного сустава, за последние 15 лет так и не удалось добиться значительного увеличения сроков функционирования эндопротеза в организме больного [1,12]. Ревизионное протезирование производится уже при гораздо худшем состоянии костной ткани, как из-за неблагоприятного воздействия удаленного эндопротеза на костную ткань и организм в целом, так и за счет возрастных изменений. Поэтому проблема увеличения срока функционирования эндопротеза тазобедренного сустава остается на сегодняшний день весьма актуальной и требует подключения к ее решению ведущих специалистов в области медицины, конструирования и материаловедения.

По мнению некоторых авторов, выбор материалов, проблема фиксации компонентов эндопротеза в костной ткани, а также соответствующего дизайна ножек и чашек имплантатов, как и проблема пары трения уже решены в импортных эндопротезах [12]. Действительно, сегодня на рынке предлагается такое множество конструкций, что суть проблемы видится на первый взгляд лишь в правильном выборе необходимой конструкции для конкретного клинического случая. И, тем не менее, ограничение срока службы эндопротезов существует, а идеальный эндопротез тазобедренного сустава еще не создан.

Отсутствие подробного анализа осложнений, вызванных конструкцией имплантата, подбором материалов, из которых изготовлены его компоненты, качеством обработки несущих поверхностей шарнирного соединения и поверхностей, контактирующих с костной тканью, усугубляет проблему крайне неудовлетворительного срока службы современных эндопротезов тазобедренного сустава, особенно для молодых пациентов.

Существует несколько теорий по поводу причин возникновения асептической нестабильности компонентов эндопротеза, а именно: иммунная, воспалительная, термическая, некротическая и биомеханическая.

Воспалительная, термическая и некротическая теории больше связаны с технологией проведения операции. Омертвление, или некроз, тканей происходит при химическом, механическом или тепловом воздействии. Оценка этого воздействия особенно актуальна при цементном протезировании. При бесцементном эндопротезировании тазобедренного сустава иммунная реакция на материал эндопротеза и его биомеханическое несоответствие в конечном счете являются причинами асептической нестабильности компонентов эндопротеза.

Иммунная реакция организма всецело зависит от биосовместимости материала. Биосовместимость, как обобщенное (интегрированное) понятие, включает в себя три главных свойства биоматериала – реактогенность, реактивность и генерализованное (системное) влияние на организм.

Вступая во взаимодействие с внутренней средой организма, биоматериал оказывается по отношению к организму инородным телом. Нормальной естественной реакцией живого организма на инородное тело является реакция отторжения. Если реакция отторжения в силу каких-либо обстоятельств неосуществима или неэффективна, то происходит изоляция инородного тела, что завершается образованием капсулы. Толщина и качество этой капсулы и определяют биосовместимость материала. Чем тоньше слой фиброзной капсулы вокруг имплантата, тем выше его биоинертность по отношению к окружающим тканям, и тем лучше его биосовместимость.

Все биоматериалы, без исключения, обладают свойством, названным реактогенностью. Реактогенность – это присущая биоматериалу способность вызывать определенную реакцию со стороны соприкасающихся с ним клеток и тканей. Одновременно происходит и обратное воздействие внутренней среды на имплантат, что определяется реактивностью биоматериала.

Под реактивностью биоматериала следует понимать его способность самому реагировать на те условия, в которые он попадает во внутренней среде организма. Речь в этом случае идет о поведении биоматериала в организме и об изменениях, которым он подвергается после имплантации в период своего функционирования, реагируя на условия внутренней среды

организма. Эти изменения могут быть настолько значимыми, что имплантированный материал, изначально казалось бы вполне удовлетворяющий предъявляемым к нему требованиям, не справляется со своими задачами.

Влияние имплантированных биоматериалов на организм не ограничивается локальной реакцией, протекающей в тканях, непосредственно соприкасающихся с имплантатом или расположенным вблизи от него. Как правило, при имплантации биоматериалов, прежде всего, необходимо считаться с их возможным общим, генерализованным влиянием на организм в целом или – другими словами – с системным влиянием, направленным на функционирование удаленных от имплантата органов и систем. Например, микропримеси в чистом титане типа железа, хлора, особенно такие легирующие компоненты титановых сплавов как ванадий и алюминий не только не способствуют биосовместимости, но и, накапливаясь в тканях, могут оказывать токсическое воздействие на организм больного [2]. Кроме того, термин биосовместимость распространяется не только на биоматериал и имплантат в целом, но также и на продукты деструкции биоматериала [13].

Модифицируя свойства биоматериала (химические, поверхностные, физические и иные), можно вмешиваться в течение вызываемой им реакции, приспособлявая ее к тем задачам, ради которых производится имплантация биоматериала, тем самым изменяя его биосовместимость.

Большое влияние на реактивность и реактогенность материала имплантата оказывает микрорельеф его поверхности, причем качество подготовки поверхности должно определяться теми тканями, с которыми будет контактировать имплантат, а также длительностью его нахождения в организме. Для изделий, предназначенных для технологий оперативных вмешательств с длительными сроками пребывания в организме, особенно контактирующих с мягкими тканями, требуется минимизировать их химическое воздействие на организм, и поэтому необходима поверхность с предельно низкой шероховатостью для уменьшения поверхности контакта с тканями. Снижение высоты микрорельефа поверхности на несколько единиц позволяет на несколько порядков уменьшить приведенную поверхность контакта. Учитывая, что процессы биохимического взаимодействия имплантатов с тканями развиваются на клеточном уровне, требования к шероховатости поверхности вполне оправданны [14].

Совсем другие требования к микрорельефу поверхности предъявляются в том случае, когда имплантаты контактируют с костной тканью. В

этом случае стремятся изготавливать имплантаты с развитым микрорельефом поверхности с тем, чтобы увеличить площадь контакта и повысить способность к интеграции с костной тканью. Это качество поверхности хорошо изучено и широко используется. Поверхность имплантата должна в максимальной степени обеспечить его функционирование в различных тканях организма. Таким образом, придание максимально возможной биосовместимости поверхности имплантата является главной задачей при его изготовлении.

Поскольку эндопротезы суставов интегрированы в костно-мышечную систему организма, они не только сами находятся под воздействием постоянно возникающих статических, циклических и спонтанных механических нагрузок, но и передают их воздействие на окружающую костную ткань. Поэтому материалы, предназначенные для их изготовления, должны обладать высокой биосовместимостью и механическими свойствами, обеспечивающими их толерантность к костной ткани, то есть не разрушать последнюю. Характер передачи усилий, направленных на костное ложе со стороны эндопротеза тазобедренного сустава зависит прежде всего от биомеханических свойств его материалов и определяется рядом его механических свойств (таких, как упругость, пластичность, жесткость, характер деформации от времени, прочность, усталость, твердость, сопротивление износу). Важна также конструкция эндопротеза, которая бы обеспечивала допустимые напряжения в кости.

Современные безцементные эндопротезы тазобедренного сустава состоят из трех основных компонентов: бедренного и ацетабулярного, соединенных шарниром. Анализ выживаемости современных эндопротезов с учетом их биологических и биомеханических свойств показывает, что ни один из указанных компонентов не соответствует необходимым требованиям.

Функциональная задача ацетабулярного и бедренного компонентов состоит в прочной фиксации в кости и закреплении в них шарнирного соединения, что в целом должно обеспечить функциональную целостность сустава, который они замещают. Эти компоненты постоянно подвергаются различного рода нагрузкам, которые они должны передать на кость, не создавая при этом в ней напряжений, приводящих к ее разрушению. То есть, во-первых, механические свойства этих компонентов должны быть близки к механическим свойствам окружающей костной ткани. Во-вторых, имплантат должен быть настолько плотно зафиксирован в костной ткани,

насколько этого требуют статические и динамические нагрузки. И наконец, в-третьих, упругие деформации имплантата должны стимулировать остеогенез оперированной костной ткани. Ясно, что эти условия не являются достижимыми при образовании вокруг имплантата мягкой фиброзной капсулы.

На сегодняшний день в качестве материала для изготовления этих двух компонентов наиболее подходящими по всему комплексу этих требований являются титан и его сплавы. Этот выбор обоснован оптимальным сочетанием его биоинертности и механических свойств. Однако чистый титан не обладает достаточными прочностными характеристиками, поэтому для изготовления ножек тазобедренного сустава используются его сплавы Ti-6Al-4V или Ti-6Al-7Nb, обладающие, тем не менее, худшими показателями упругости и биоинертности из-за введения в их состав таких химических элементов, как ванадий или алюминий. Даже между поверхностью титана, считающегося по биоинертности лучшим из металлов, и новообразованной костной тканью при электронно-микроскопическом исследовании обнаруживается аморфный, лишь частично минерализованный слой толщиной до 20 мкм. То есть непосредственная связь между поверхностью титана и костной тканью не образуется. Пористость в таких случаях увеличивает площадь контакта, но не убирает фиброзный слой, образующийся между стенками пор и регенератом [13]. Нанесение слоя покрытия из гидроксилатапата улучшает адгезию, но существующие технические возможности ограничивают толщину этого слоя, резорбция которого препятствует в полной мере выполнению им своей функции.

Самым проблемным с точки зрения сочетания прочностных, трибологических и биологических характеристик является третий компонент эндопротеза тазобедренного сустава – шарнирное соединение. На данный момент материал, удовлетворяющий всем необходимым требованиям с точки зрения соответствия и биомеханики и биосовместимости для изготовления пары трения, не существует. Многочисленные работы указывают также на то, что гранулематозное воспаление с разрушением костной ткани вокруг компонентов эндопротеза чаще встречается в случаях применения металлполимерных эндопротезов. Исходя из этого вывода швейцарская школа исследователей в конце 1980-х гг. создает проект возвращения к металл-металлическим узлам трения эндопротезов с более высоким качеством изготовления и обработки металла. Практически единственный сплав, который используется для

изготовления пары трения из металла – кобальтохромовый сплав. Одним из его наиболее важных преимуществ является высокая устойчивость к истиранию, что обеспечивает длительную эксплуатацию трущихся поверхностей. Литые сплавы обладают кроме того высокой коррозионной устойчивостью [12,15–16]. Пары трения металл-металл остаются популярным решением при полной замене тазобедренного сустава и являются единственным доступным вариантом при замене одной из несущих поверхностей. В целом, среднесрочный клинический эффект применения пар трения металл-металл был благоприятным. Однако вызывают беспокойство биологические последствия выделения металла из этих поверхностей, выражающиеся как в локализованном тканевом ответе (включая реакции гиперчувствительности замедленного типа у ряда пациентов), так и в потенциальных общих эффектах (таких как хронически повышенная концентрация кобальта и хрома в сыворотке крови) [17].

Прогрессивной в этом смысле является стратегия, направленная на снижение нагрузки на несущую поверхность и связанным с ней выделением металла в окружающие эндопротез ткани, что в свою очередь будет смягчать проблему биологического ответа на металлические продукты износа. Поэтому большие надежды сейчас связывают с металл-металлической парой трения третьего поколения, в которой используются головки большого диаметра – более 36 мм. Стендовые испытания показали высокую износостойкость такой пары, что определяет долговечность их работы в организме человека. Однако с уверенностью об этом можно будет говорить только через 8–10 лет, когда появятся отдаленные результаты их использования [12]. Тем не менее, проблема, связанная с влиянием частиц металла на окружающие ткани и организм в целом, остается [14]. Частицы титана, сплавов титана, сплавов хрома, даже в низких концентрациях стимулируют пролиферативную активность фибробластов. Аналогичное влияние на фибробласты обнаружено и у частиц полиэтилена. Все это способствует развитию фиброзной капсулы и снижению стабильности фиксации имплантата. При этом большую роль играет размер частиц износа – учитывая наноразмерность частиц, естественная реактогенность материала в этом случае превращается в патогенную [18].

Популярность применения в эндопротезе керамо-керамической пары трения на основе оксида алюминия в настоящее время снижается. Преимущество ее заключается в исключительно высокой износостойкости и биоинертности. Такая пара трения характеризуется очень высокой прочностью и стойкостью к механическому контактному повреждению, а

при клиническом применении обеспечивает прекрасную смазку и износостойкость в сравнении с другими несущими поверхностями. Общий износ такой пары по литературным данным в 1000 раз меньше, чем у пары металл-полиэтилен, и в 40 раз меньше, чем у пары металл – металл. Недостаток – хрупкость, что в некоторых случаях ведет к переломам головки или вкладыша впадины [12].

По мнению некоторых исследователей, очень перспективной является сапфир-сапфировая пара трения, трибологические и прочностные свойства которой, в сочетании с высокой биоинертностью очень заманчивы для использования в современных эндопротезах [12]. Медико-биологические исследования показали, что сапфир не токсичен для живого организма, не вызывает изменений функций центральной нервной системы, печени, почек, белкового и жирового обмена, общей реактивности, не обладает канцерогенным, мутагенным, эмбриотропным и другими видами отдаленного действия. В отличие от металлов электрически нейтральный сапфир не переносится электрохимическими реакциями в лимфатические узлы и другие части тела, не вызывает иммунодепрессии и других изменений иммунной системы, не приводит к деминерализации прилегающей костной ткани. Стойкость сапфира к любым кислотам и щелочам несоизмеримо выше, чем у металлов и даже поликристаллического оксида алюминия. По-видимому, поэтому сапфир не изменяет иммунный статус пациента, тогда как в 73% случаев имплантации металлических имплантатов (особенно у мужчин) наблюдается иммунодепрессия, изменения иммунореактивности и другие иммунные сдвиги, что повышает вероятность послеоперационных осложнений. Однако низкая трещиностойкость сапфира существенно ограничивает использование такой пары.

Керамика на основе ZrO_2 характеризуется уникальным комплексом механических свойств: высокой износостойкостью, низким коэффициентом трения, более высокой стойкостью к росту трещин по сравнению с Al_2O_3 , отличной биоинертностью, что делает ее привлекательной для использования в качестве биоимплантатов. С одной стороны, ZrO_2 -керамика имеет наиболее высокие характеристики прочности благодаря эффекту трансформационного упрочнения. Однако характерной чертой керамических имплантатов стандарта Y-TZP является нежелательный фазовый переход метастабильных твердых растворов ZrO_2 в моноклинные твердые растворы, который сопровождается увеличением объема (до 6 % объемных) и вызывается многими факторами (химический и фазовый состав, размер зерен и их морфология, наличие остаточных

напряжений) и известный как процесс «старения». В начальной стадии процесс «старения» вызывает увеличение шероховатости полированной рабочей поверхности имплантатов (т.е. растет степень износа), а в конечном счете, при значительном содержании моноклинной фазы, приводит к их полному разрушению. Стойкость во влажных и агрессивных средах и повышенных температурах определяют как «гидротермальную стойкость». Этот процесс в указанных условиях ускоряется и поэтому основной проблемой многочисленных исследований во всем мире является установление причин, которые стимулируют переход и их устранение или, по меньшей мере, снижение их влияния до приемлемых значений. Поскольку технологический процесс производства головок шейки бедра является достаточно сложным и многостадийным, эти исследования охватывают различные звенья технологического процесса, начиная от метода синтеза исходных порошков, способов их формования, термической обработки и полирования, и заканчивая особенностями дизайна эндопротеза.

Характерной чертой работ, связанных с разработкой технологии изготовления головок шейки бедра, проводимых в Европе, является использование исходных порошков, синтезированных и поставляемых на рынок японскими фирмами (например, Y-TZP, Tosoh, Tokyo, Japan). Использование готовых порошков строго определенного состава в значительной степени ограничивает возможность целенаправленной, мягкой корректировки базового состава ($97 \text{ ZrO}_2 - 3 \text{ мол. \% Y}_2\text{O}_3$), и, тем самым, характеристик микроструктуры керамического материала, ответственных за его фазовую стабильность. Установление оптимальных химических составов исходных порошков, методов их дальнейшей переработки в головки шейки бедра, которые приведут к повышению фазовой стабильности тетрагональных твердых растворов на основе ZrO_2 в гидротермальных условиях (т.е. стойкость к «старению») безусловно представляет интерес для различных исследовательских центров и производителей керамических имплантатов независимо от того, в какой стране это будет сделано.

По мнению ряда экспертов, основной нерешенной проблемой последнего десятилетия была разработка шарнирного соединения, которое могло бы выдержать более высокие нагрузки у молодых и более активных пациентов. Несущие поверхности, которые в настоящее время исследуются в лабораторных условиях ввиду их обнадеживающих характеристик износа – керамическая матрица (82% оксида алюминия, 17% диоксида циркония, 0,3% оксида хрома), диоксид циркония и керамика в паре кобальтохромовым сплавом [19].

Суммируя вышеизложенное, следует отметить, что развитие эндопротезирования суставов требует решения целого ряда задач и

проблем. Идеальный эндопротез тазобедренного сустава должен обладать свойствами, близкими к свойствам тех участков кости и хряща, которые он замещает. Поэтому, к улучшению эффективности имплантата всегда приводят действия, направленные на улучшение биосовместимости используемых материалов, а также на приближение его биомеханических свойств к биомеханическим свойствам кости. Также важна конструкция имплантата, обеспечивающая его интеграцию в костную ткань и максимально снижающая напряжения в кости при передаче нагрузки.

Проведенные Институтом сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины в последнее десятилетие комплексные технологические трибологические, иммунологические исследования биоинертных кристаллических, керамических материалов [20–26] позволили определить наиболее перспективную пару трения для изготовления шарнирного соединения эндопротезов тазобедренных суставов, а именно: пару трения "сапфир – циркониевая керамика".

Накопленный опыт практического эндопротезирования суставов, анализ мировых тенденций совершенствования несущих поверхностей эндопротезов суставов, взаимный интерес к сотрудничеству с компанией *Copf-Bionic* (Германия), а также многолетние исследования в области разработки материалов, технологии изготовления имплантатов, позволили нам выдвинуть общие принципы создания тотального эндопротеза тазобедренного сустава нового поколения. В настоящее время инициативная группа специалистов во главе с проф. О.А. Розенбергом ведет переговоры с компанией *Copf-Bionic* о совместной разработке такого эндопротеза.

Разрабатываемый тотальный эндопротез тазобедренного сустава нового поколения должен иметь ячеистую конструкцию посадочных компонентов (бедренной ножки и вертлужной чаши), выполняемых из металлического сплава, которая значительно увеличивает несущую площадь посадочных поверхностей эндопротеза, способствует тем самым росту и уплотнению регенерата вокруг этих поверхностей, обеспечивая прочную и долговременную интеграцию компонентов в костную ткань. Благодаря запатентованной компанией *Copf-Bionic* арочно-ячеистой конструкции бедренной ножки *Phisiohip*, включая горизонтальное расположение ее медиальной опоры, обеспечивается равномерное распределение нагрузки на вещество губчатого слоя, остаточный объем которого сохраняется в 4 раза большим (рис. 1). Анатомическая конфигурация, конгруэнтная проксимальному отделу бедренной кости, существенно снижает вероятность расшатывания ножки при ее бесцементной фиксации.



Рисунок 1 – Опорная пластина ножки *Phisiohip* в медиальном направлении опирается на корковый слой вдоль горизонтальной линии резекции, а в дорсальном и вентральном направлениях переходит в тело протеза, не выступая за кромку [27].

Арочная конструкция разрабатываемой вертлужной чаши увеличивает несущую площадь посадочной поверхности, способствуя ее врастанию в окружающую костную ткань, и позволяет приблизить упругие свойства ее посадочной поверхности к упругим свойствам костной ткани, не только снижая (или полностью исключая) травмирование, но и, наоборот, стимулируя развитие окружающих костных тканей при упругих деформациях скелета.

Разрабатываемая пара трения будет комбинированной. Вертлужная чаша арочной конструкции модульного типа будет иметь вкладыш из искусственного сапфира. Упругая ячеистая малоинвазивная бедренная ножка будет иметь головку из циркониевой керамики диаметром 32–40 мм (рис. 2). По результатам проведенных нами иммунологических и трибологических исследований такая пара обладает на данный момент наилучшим среди керамических пар сочетанием показателей биосовместимости, прочности и износостойкости.

Трибологические испытания пар трения биосовместимых материалов являются одним из критериев выбора материалов для несущих шарнирных поверхностей эндопротезов суставов человека. С этой целью исследовали трибологические свойства пар трения сапфир – ZrO_2 -керамика, произведенная ИПМ (г. Киев) и ДонФТИ (г. Донецк), некоторые физико-механические характеристики которой приведены в таблице.

Целью трибологических испытаний было исследовать коэффициент трения и линейный износ пар трения материалов в ходе 3-часового

экспресс-испытания на испытательной машине Т-20¹ по схеме вращательного трения в трибосистеме типа "шар-по-диск" (рис. 3).



Рисунок 2 – Пара трения вкладыш вертлужной чаши из сапфира – бедренная головка из ZrO₂-керамики.

Трибосистема установки Т-20 состоит из неподвижного плоского диска и шара, вращающегося с заданной скоростью n (рис. 4, а). Диск прижимается к шару с определенной нагрузкой P . При испытаниях измеряется сила трения, линейный износ пары. Плоский диск изготавливали из сапфира, ориентируя его в направлении $\{0001\}$ кристаллической решетки, шар – из исследуемого материала.

Таблица – Свойства биосовместимых материалов

Характеристики	сапфир	ZrO ₂ -керамика (ИПМ*)	ZrO ₂ -керамика (ДонФТИ**)
Прочность при изгибе, МПа	>400	>800	850
Коэффициент трещиностойкости K_{IC} , МПа·м ^{-1/2}	3,5	>7–9	8–11
Модуль Юнга, ГПа	400	200	209
Содержание тетрагональной фазы, %	–	>98	100
Плотность, г/см ³	3,99	6,01–6,02	6,03–6,05
Общая пористость	–	0	0
Открытая пористость	–	0	0
Микротвердость, ГПа	19,4–22	10–12	10–12
Содержание Y ₂ O ₃	–	3 %	3 %
Обработка в автоклаве	–	Возможна	

* – Институт проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины.

** – Донецкий Физико-технический институт им. А.А. Галкина НАН Украины.

¹ Испытания проведены к.т.н. Возным В.В.

Условия испытаний:

- нагрузка 10 Н;
- частота вращения шара 60 об/мин;
- рабочая жидкость раствор Рингера;
- количество циклов нагружения 1×10^6 циклов;
- температура испытаний 37 °С;
- интервал регистрации данных 5×10^4 циклов.

Результаты трибологических испытаний показаны на рис. 4–5 в виде графиков кривых отношения силы трения к силе прижима и линейного износа дисков из исследуемых материалов по ходу 3-х часов трения. На рис. 6 показаны фотографии пятен износа на поверхности диска из сапфира {0001}.

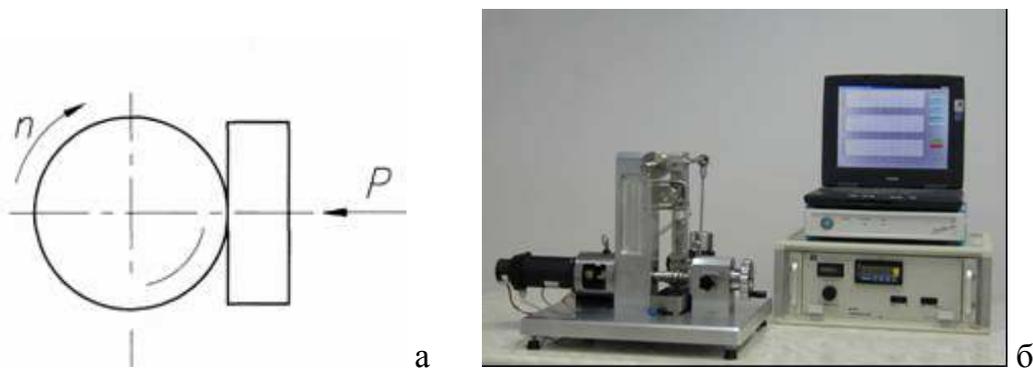


Рисунок 3 – Схема вращательного трения в трибосистеме типа "шар-по-дису" – а, и общий вид установки Т-20 – б.

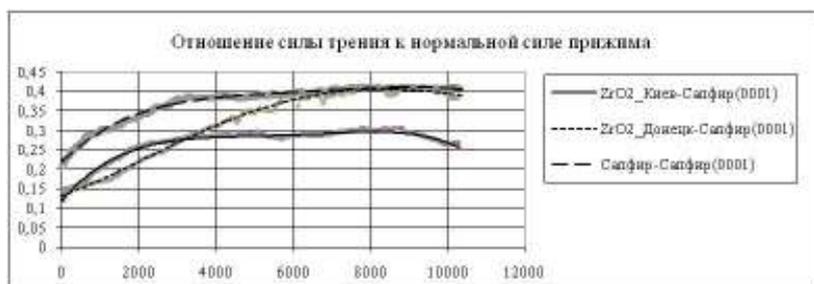


Рисунок 4 – Кривые относительной силы трения пар скольжения испытанных материалов с диском из сапфира (0001) за 3 часа испытаний.

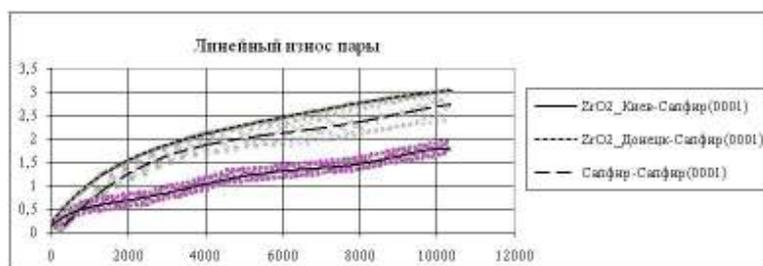


Рисунок 5 – Кривые изменения линейного износа пар скольжения испытанных материалов с диском из сапфира (0001) за 3 часа испытаний.

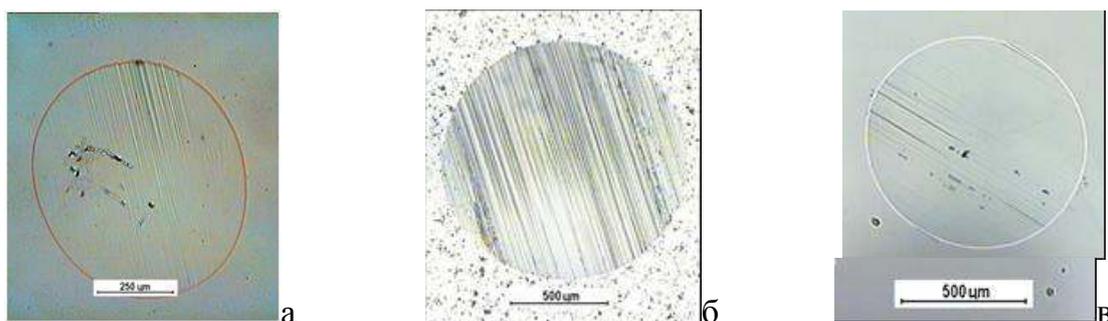


Рисунок 6 – Фотографии пятен износа на поверхности диска из сапфира (0001) после изнашивания: сапфиром – а, ZrO₂_Донецк – б, ZrO₂_Киев – в.

Из результатов проведенных испытаний следует, что:

Трибологические характеристики ZrO₂-керамики, произведенной ИПМ, в паре с контртелом из сапфира существенно лучше характеристик пары сапфир/ сапфир (сила трения ниже в 1,3 раза, линейный износ – в 1,5 раза).

Размер пятна износа в направлении трения на диске сапфира {0001} (800 мкм) меньше, чем у дисков ZrO₂-керамики: ИПМ – в 1,1 раза (900 мкм), ДонФТИ – в 1,5 раза (1200 мкм).

В иммунологических исследованиях проверяли чувствительность стромальных клеток костного мозга человека к сапфиру, ZrO₂-керамике. Стромальные клетки были выбраны из-за их высокой чувствительности ко всем металлам и ядовитым субстанциям. Прижизненные наблюдения фиксировали на 5-ый, 10-ый, 20-ый и 25-ый день культуры *in vitro*. Испытываемые *in vitro* материалы показали хорошую биосовместимость. Как материалы, предполагаемые к имплантации, сапфир, ZrO₂-керамика не вызывают иммуно-аллергическую реакцию. Поскольку испытываемый материал легко покрывается культивируемыми клетками *in vitro*, это доказывает отсутствие цитотоксичности. Не установлено никаких заметных изменений в количестве или морфологии клеток вокруг имплантатов или в клетках, непосредственно соприкасающихся с этими материалами. Не установлено никаких заметных различий в количестве живых клеток между исследованным и сопоставимым контрольным (только клетки) материалами. Сапфир и керамика, испытываемая *in vivo* (кролики) показали превосходную биосовместимость. Имплантат был частично окружен соединительной тканью, среди которой можно видеть мало фибробластов, наиболее густо у диафизарной части кости. Регенерированный костный мозг образовался прямо на поверхности имплантата. Костный мозг и его васкулатура наполняли тонкий слой между костью, покрытой эндостом, и имплантатом. На поверхности

мозгового вещества, охватывающего имплантат, был тонкий слой эндотелиальных клеток очень тонкой структуры, который, как правило, разрушался, когда имплантат извлекали (рис. 7). Тем не менее, некоторая часть его оставалась на месте. Таким образом, следует отметить отсутствие враждебной реакции на внедренный материал. Уже на второй день после операции, животные вели себя обычно, ели и показали деятельность, свойственную их виду.

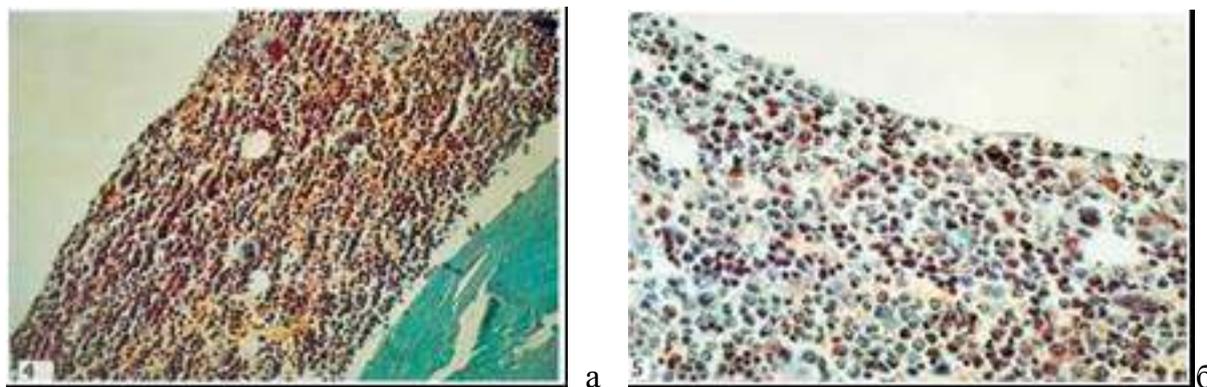


Рисунок 7 – Тонкий слой эндотелиальных клеток очень тонкой структуры, охватывающий имплантат при меньшем (а) и большем (б) увеличении [22].

Так как ножка эндопротеза и вертлужная чаша, контактирующие с костной тканью, выполнены из металлического сплава, они обладают определенной реактогенностью по отношению к окружающим тканям. Для улучшения процесса остеоинтеграции этих компонентов разработана методика нанесения на их поверхность слоя покрытия из биоактивной керамики с титановым подслоем, имеющим развитый рельеф поверхности, методом микроплазменного напыления.

Биоактивная керамика на основе гидроксилapatита, благодаря своему химическому сходству с минеральным компонентом костной ткани, обеспечивает биологическую связь с костной тканью без образования фиброзной капсулы (рис. 8). Наличие ионов кальция и фосфатов, способствует минеральному обогащению костной ткани на поверхности имплантата, хорошей интеграции имплантата с костью, создает нормальное протекание процесса остеосинтеза за счет активизации биологических процессов [13,28].

Порошок для нанесения покрытия разработан с учетом воздействия на него высоких температур и требуемыми характеристиками текучести в ЦНТП Рапид. Покрытия на титановые имплантаты наносились методом микроплазменного напыления титана и гидроксилapatита в аргоновой плазме

с минимальными потерями напыляемого порошка. Уникальный метод нанесения пористого титанового покрытия с ГАП, разработанный специалистами Института электросварки им. Патона не имеет аналогов в мире. Благодаря пористому подслою, адгезия такого покрытия с основой 50-60 МПа, на сдвиг 25-30 МПа, это позволяет увеличить толщину покрытия до 200 мкм, что значительно превосходит аналогичные показатели (рис. 9) [29].



Рисунок 8 – Образцы титана с покрытием из биоактивной керамики на основе гидроксилапатита

Малый диаметр пятна напыления и низкая тепловая мощность микроплазменной струи позволяет ограничить нагрев основы, что обеспечивает возможность нанесения покрытий на изделия малых размеров и с тонкими стенками без излишнего локального перегрева и коробления. Применение чистого аргона в качестве плазмообразующего газа в сочетании с относительно невысокими скоростями частиц биокерамики в микроплазменной струе способствует снижению содержания аморфной фазы в покрытии и продуктов разложения исходного материала по сравнению с другими газотермическими биокерамическими покрытиями.

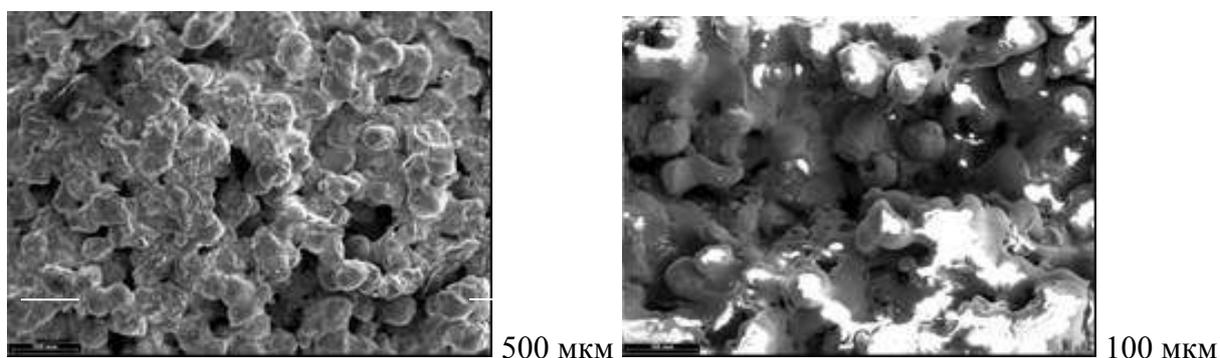


Рисунок 9 – Микроструктура поверхности с пористым титановым покрытием (слева) и покрытием из гидроксилапатита на подслое из пористого титана (справа)

Биоактивное покрытие способствует установлению биохимической связи с окружающей костной тканью, что позволяет значительно сократить срок вживления, обеспечивает надежную связь с костью и увеличивает срок службы имплантатов вследствие образования на их поверхности слоя, который точно воспроизводит состав и структуру кости, что придает биосовместимые свойства металлическим имплантатам. Покрытие позволит оптимально использовать имплантаты без иммунной реакции, металлоза и лизиса окружающей костной ткани [30–31].

Такой подход позволяет получить конструкции, в которых успешно сочетается биомеханическое соответствие той кости, в которую вводится имплантат, с возможностью достижения оптимальной остеоинтеграции, а также защиты организма человека от проникновения токсичных элементов.

Увеличенный размер головки (от 36 мм) способствует снижению риска вывихов, а также благоприятному для повышения прочности компонентов и износостойкости пары трения, распределению контактных нагрузок.

Расширенный диапазон размеров вертлужной чаши (42–68 мм) позволяет применять разрабатываемый эндопротез в подавляющем большинстве клинических случаев.

Таким образом, предложенный комплекс прогрессивных конструктивных, материаловедческих, технологических решений позволяет создать принципиально новый тип тотального эндопротеза тазобедренного сустава нового поколения.

Список литературы: 1. *Гайко Г.В., Підгасцький В.М. и др.* Передумови розвитку асептичної нестабільності тотального бесцементного ендопротеза кульшового суглоба (біомеханічне та математичне моделювання) // Ортопедия, травматология и протезирование (ОТП).– 2009.– №1.– С.10-18. 2. *Маслов А.П.* К вопросу эндопротезирования тазобедренного сустава // ОТП.– 2008.– №2.– С.10-14. 3. *Корж Н.А., Филиппенко В.А. и др.* Проблема эндопротезирования суставов в Украине и пути ее решения // ОТП.– 2008.– №2.– С.5-9. 4. *Мителева З.М.* Биомеханика – философия ортопедического мышления // ОТП.– 1997.– №3.– С.26-28. 5. *Рыбачук О.И.* Ошибки и осложнения при эндопротезировании тазобедренного сустава // ОТП.– 1997.– №2.– С.13-14. 6. *Лоскутов А.Е., Олейник А.Е. и др.* Алгоритм выработки показаний и противопоказаний к эндо протезированию тазобедренного сустава // Вісник ортопедії, травматології і протезування.– 2004.– №3(42).– С.8-12. 7. *Лоскутов А.Е., Красовский В.Л. и др.* Определение оптимальных размеров ножки тотального эндопротеза тазобедренного сустава системы «ОРТЭН» // ОТП.– 2008.– №2.– С.23-28. 8. *Олейник А.Е., Красовский В.Л. и др.* Биомеханический анализ конструкции бедренного компонента эндопротеза тазобедренного сустава системы «ОРТЭН» // ОТП.– 2009.– №1.– С.17-25. 9. *Филиппенко В.А., Тянькут А.В. и др.* Ревизионное эндопротезирование тазобедренного сустава / XIII з'їзд ортопедів-травматологів України: Зб. наук. праць.– 12-14 вересня 2001р.– С.128-130. 10. *Корнилов Н.В.* Хирургическое лечение дегенеративно-дистрофических повреждений тазобедренного сустава. – СПб.: ЛИТО-Синтез, 1997.– 291с. 11. *Herberts P. et al.* // Clin. Orthop.– 249, 1989.– P.48–55. 12.

Филиппенко В. А., Танькут А.В. Эволюция проблемы эндопротезирования суставов // Международный медицинский журнал.– №1.– 2009.– С.70-74. 13. Слуцкий Л., Ветра Я. Биологические вопросы биоматериаловедения.– Рига: Латвийская медицинская академия.– 2001. 14. Бурьянов А.А., Корж Н.А. и др. Металлические материалы для имплантатов ортопедического и травматологического назначения // ОТП.– 2008.– №3.– С.5-10. 15. Min Wang. Developing bioactive composite materials for tissue replacement // Biomaterials.– 24(2003).– P.2133-2151. 16. Weber H., Geis-Gerstorfer J. Comparative Study of Bond Characteristics between Titanium/Titanium Alloy and Ceramic.– Korea, 2004. 17. Jacobs J.J., Hallab N.J. Loosening and osteolysis associated with metal-on-metal bearings: A local effect of metal hyper-sensitivity? // Bone Joint Surg Am.– 88, 2006.– P.1171-1172. 18. Вильямс Д.Ф., Роуф Р. Имплантаты в хирургии.– М.: «Медицина».– 1978. 19. Lieberman J.R. Two Alternative Bearings for Total Hip Arthroplasty: More Data Are Needed // J Am Acad Orthop Surg.– 17, 2009.– P.61-62. 20. Новиков Н.В., Розенберг О.А. и др. Развитие работ и тенденции совершенствования технологий изготовления эндопротезов суставов в Украине и мире // Високі технології в машинобудуванні: Зб. наук. праць.– Харків: НТУ «ХПІ».– 2, 2008.– С.262-277. 21. Rozenberg O.A., Sokhan' S.V. et al. Development of research for machining of implants with novel materials for bone surgery // IFMBE Proceeding.– 20. 14th Nordic-Baltic Conf. on Biomedical Engineering and Medical Physics.– 16–20 June, 2008.– Riga, Latvia.– P.156–159. 22. Недзведзкі Т., Дабровскі З. и др. Суправитальное тестирование сапфирового имплантата, введенного в полость кости у кролика, и in vitro тестирование влияния сапфировых пластинок на стромальные клетки костного мозга и пупочные эндотелиальные клетки у человека // ОТП.– 2009.– №1.– С.92-95. 23. Розенберг О.А., Возный В.В. и др. Исследование трения в парах трения сапфир/ сапфир и сапфир/рубин // Сучасні технології в машинобудуванні: Зб. наукових праць. – Харків: НТУ «ХПІ».– 1, 2008.– С.164-176. 24. Розенберг О.А., Шульженко А.А. и др. Влияние анизотропии сапфира на иммунологические, трибологические и прочностные характеристики материала // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні: Зб. наук. праць.– Запоріжжя: ЗНТУ.– 2, 2007.– С.32-40. 25. Rozenberg O.A., Mamalis A.G. et al. Trends and developments in the manufacturing of hip joints: an overview // Int J Adv Manuf Technol.– 27(2006).– P.537-542. 26. Розенберг О.А., Возный В.В. и др. Трибологические свойства сапфира применительно к использованию в эндопротезах тазобедренного сустава // Високі технології в машинобудуванні: Зб. наук. праць. – Харків: НТУ "ХПІ".– 4, 2005.– С.336–338. 27. Copf Franz, Nitard F.U. et al. Бесцементное замещение сустава на основе технического применения биологических решений в преципитальной Femur и Acetabulum / Доклад к 100-летию Юбилею ортопедов: сб. докл.– Харьков, 2007. 28. Баринев С.М., Комлев В.С. Биокерамика на основе кальция.– М.: Наука, 2005.– С.16. 29. Борисов Ю.С., Ульянович Н.В. и др. Исследования in vitro биосовместимости покрытий из остеотропной керамики на титановых имплантатах // Вісник ортопедії, травматології та протезування.– 2001.–№1.– С.50-52. 30. Путьяев В.И. Современные биокерамические материалы // Соросовский образовательный журнал.– 2004.– №1.– С.44-50. 31. Hydroxylapatite Coatings in Orthopaedic Surgery / Edited by Geesink R.G.T. and Manley M.T.– Raven Press, Ltd., New York, 1993.– 230 p.

М. С. САЗОНОВА, канд. физ.-мат. наук,
Е. Е. ЗАПОРОЖЧЕНКО, канд. физ.-мат наук, Днепропетровск, Украина,
С. Н. ЛАВРИНЕНКО, канд. техн. наук, Харьков, Украина,
А. Г. МАМАЛИС, д-р техн. наук, Афины, Греция

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ МИКРОПРОФИЛЯ ОБРАБОТАННЫХ УЛЬТРАПРЕЦИЗИОННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

У теперішній час підвищується рівень вимог до метрології параметрів шорсткості, методів контролю, обробки й візуалізації отриманих результатів. Метою даної статті є підвищення точності визначення періодичних складових мікропрофілю оброблених ультрапрецизійних поверхонь за рахунок аналітичного моделювання й одержання розрахункових формул для визначення необхідного числа вимірів основних параметрів шорсткості.

В настоящее повышается уровень требований к метрологии параметров шероховатости, методам контроля, обработки и визуализации полученных результатов. Целью данной статьи является повышение точности определения периодических составляющих микропрофиля обработанных ультрапрецизионных поверхностей за счет аналитического моделирования и получения расчетных формул для определения необходимого числа измерений основных параметров шероховатости.

At the present time the level of requirements to metrology of parameters of a roughness, a quality monitoring, processings and visualisation of the received results is raising. The purpose of given article is increase of accuracy of definition of periodic components of a microprofile of the processed ultraprecision surfaces at the expense of analytical modelling and reception of settlement formulas for definition of necessary number of measurements of key parameters of a roughness.

В настоящее время возникает все больше предпосылок для глубоко изучения корреляционных связей между параметрами шероховатости поверхности, сформированной в процессе ультрапрецизионной лезвийной обработки и функционально-эксплуатационными свойствами готового изделия. При этом повышается уровень требований к метрологии параметров шероховатости, методам контроля, обработки и визуализации полученных результатов. Целью данной статьи является повышение точности определения периодических составляющих микропрофиля обработанных ультрапрецизионных поверхностей за счет аналитического

моделирования и получения расчетных формул для определения необходимого числа измерений основных параметров шероховатости.

Важными параметрами шероховатости поверхности являются средний шаг неровностей S_m и средний шаг неровностей по вершинам S микрогеометрического профиля обработанной поверхности.

Известно, что параметры шероховатости, в том числе и шаговые параметры S_m и S , определяются на так называемой базовой длине L , которая зависит от величины микронеровностей. Поскольку параметры S_m и S носят статистический характер, ограниченность трассы измерения приводит к значительному разбросу их значений. В связи с этим задача определения режимов измерений, обеспечивающих получение результата с заданной точностью, является весьма важной.

Для изучения погрешности определения шаговых параметров необходимо располагать следующими статистическими характеристиками этих параметров: математическим ожиданием и дисперсией. Считаем, что шероховатость профиля описывается нормальным стационарным случайным процессом $h(x)$, имеющим математическое ожидание $E[h(x)] = 0$ и среднее квадратическое отклонение σ . Кроме того, принимаем, что данный случайный процесс имеет непрерывную корреляционную функцию и ее производные. Это обеспечивает непрерывность рассматриваемого случайного процесса и его производных.

Данная модель шероховатости пригодна для описания нерегулярной шероховатости, свойственной большинству финишных операций [1-3].

Для исследования статистических характеристик шаговых параметров воспользуемся особыми точками профиля шероховатости. Согласно [4,9], математическое ожидание особых точек n -го порядка на единицу длины трассы (в которых n -я производная процесса равна нулю, а $(n+1)$ -я отлична от нуля) определяется следующим образом:

$$E\{N_{\text{особ}}\} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\rho^{(2n+2)}(0)}{\rho^{2n}(0)}}, \quad (1)$$

где: $\rho^{(2n+2)}(0)$ и $\rho^{2n}(0)$ - соответственно $(2n + 2)$ -я и $(2n)$ -я производные корреляционной функции $\rho(\tau)$ при $\tau=0$.

В наших исследованиях ограничимся особыми точками 1-го и 2-го порядка, которыми являются, соответственно, число нулей и число максимумов случайного процесса.

Шаговые параметры S_m и S связаны с числом нулей и максимумов следующими зависимостями:

$$Sm = \frac{1}{n^+(0)} \text{ и } S = \frac{1}{m}, \quad (2)$$

где: $n^+(0)$ – число положительных нулей на единицу длины; m – число максимумов на единицу длины.

Математическое ожидание числа положительных нулей вытекает как частный случай формулы (1):

$$E\{n^+(0)\} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{-\rho''(0)}. \quad (3)$$

Проведенные исследования корреляционных функций нерегулярной шероховатости показывают, что для аппроксимации этих функций могут быть применены следующие выражения [5]:

$$\begin{aligned} \rho_1(\tau) &= e^{-\alpha\tau^2} \\ \rho_2(\tau) &= (1 + \gamma\tau^2)^{-1} \end{aligned} \quad (4)$$

где: τ – расстояние между сечениями профиля; α, γ – коэффициенты аппроксимаций.

Для этих аппроксимаций выражения математического ожидания будут, соответственно, следующими:

$$E_1\{n^+(0)\} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{2\alpha}, \quad E_2\{n^+(0)\} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{2\gamma}. \quad (5)$$

Поскольку коэффициенты корреляционных функций (4) α, γ определяются одинаковыми выражениями, то в дальнейшем будем пользоваться одной формулой.

Для определения математического ожидания параметра S_m используем выражение, дающее математическое ожидание функции $y = x(x_1, x_2, \dots, x_n)$, согласно которому [6]:

$$E[S_m] = \frac{1}{E[n^+(0)]}. \quad (6)$$

Тогда:

$$E[S_m] = \frac{2\pi}{\sqrt{2\alpha}}. \quad (7)$$

При вычислении математического ожидания шага по вершинам S вместо $h(x)$ в качестве исходного процесса рассмотрим производную его

$h'(x)=g(x)$. Известно, что реализация имеет максимумы, если выполняются следующие условия:

$$h'(x) = g(x) = 0 \text{ и } h''(x) = g'(x) < 0, \quad (8)$$

т. е. максимумы будем рассматривать как нули процесса $g(x)$ с отрицательной производной.

Тогда из общего выражения (1) получаем, что:

$$E\{n^+(0)\} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{-\rho_g''(0)}, \quad (9)$$

где: $\rho_g''(0)$ - вторая производная нормированной корреляционной функции процесса $g(x)$ при $\tau=0$.

Корреляционная функция производной $K_g(\tau)$ определяется следующим образом [7]:

$$K_g(\tau) = \frac{\delta^2 K_h(\tau)}{\delta \tau^2}, \quad (10)$$

где: (τ) - корреляционная функция исходного процесса $h(x)$.

Согласно (10), нормированная корреляционная функция производной $\rho_g(\tau)$ при $\rho(\tau) = e^{-\alpha\tau^2}$ будет:

$$\rho_g(\tau) = e^{-\alpha\tau^2} - 2\alpha\tau e^{-\alpha\tau^2}. \quad (11)$$

Дважды продифференцировав выражение (11) и используя выражения (9) и (6), получаем формулу для математического ожидания шага по вершинам:

$$E[S] = \frac{2\pi}{\sqrt{6\alpha}}. \quad (12)$$

Как видно из (7) и (12), с увеличением скорости убывания корреляционной функции математическое ожидание шаговых параметров возрастает.

Для определения дисперсии шаговых параметров воспользуемся формулой, выражающей дисперсию случайной величины через ее второй начальный момент [7]:

$$D\{x\} = \alpha_2(x) - E^2\{x\}, \quad (13)$$

где: $\alpha_2(x)$ - второй начальный момент случайной величины.

Второй начальный момент числа положительных пересечений на единицу длины согласно [4, 8,10] выражается:

$$E\{n^+(0)\} = \frac{1}{4L^2} [E\{n_L(0)\} + 2 \int_0^L (L-\tau)F(\tau)d\tau], \quad (14)$$

где: $E\{n_L(0)\}$ — среднее число нулей реализации на интервале L;

$$F(\tau) = \int_0^\infty \int_0^\infty \dot{h}(x_1)\dot{h}(x_2)f_4(0,\dot{h}(x_1),0,\dot{h}(x_2))d\dot{h}(x_1)d\dot{h}(x_2). \quad (15)$$

Подставив (14) в формулу (13), получаем формулу для дисперсии числа положительных нулей реализации $h(x)$ на единицу длины в следующем виде:

$$D\{n^+(0)\} = \frac{1}{4L^2} \left[E\{n_L(0)\} - E^2\{n_L(0)\} + \frac{2}{\pi^2} \int_0^L (L-\tau) \frac{1+H(\tau)\text{arctg}H(\tau)}{1-\rho^2(\tau)} \sqrt{G(\tau)}d\tau \right]. \quad (16)$$

Конкретизируем выражение функции $F(\tau)$ для нормального стационарного процесса. Согласно [4,10], функция $F(\tau)$ равняется:

$$F(\tau) = \frac{1+H(\tau)\text{arctg}H(\tau)}{\pi^2(1-\rho^2(\tau))} G^{-1/2}(\tau) \quad (17)$$

где: $G(\tau) = [1-\rho^2(\tau)][\rho''^2(0) - \rho''^2(\tau)] + 2[\rho''(0) - \rho(\tau)\rho''(\tau)]\rho'^2(\tau) + \rho'^4(\tau)$;

$$H(\tau) = \frac{[1-\rho^2(\tau)]\rho''(\tau) + \rho(\tau)\rho'^2(\tau)}{\sqrt{1-\rho^2(\tau)}\sqrt{G(\tau)}}. \quad (18)$$

Используя выражение (17), получаем окончательную формулу для дисперсии числа нулей на единицу длины нормального стационарного процесса:

$$D\{n^+(0)\} = \frac{1}{4L^2} \left[E\{n_L(0)\} - E^2\{n_L(0)\} + \frac{2}{\pi^2} \int_0^L (L-\tau) \frac{1+H(\tau)\text{arctg}H(\tau)}{1-\rho^2(\tau)} \sqrt{G(\tau)}d\tau \right]. \quad (19)$$

Даже для простейших дифференцируемых корреляционных функций количественные результаты относительно дисперсии числа нулей не удается получить аналитически, а приходится применять численное интегрирование или приближенные методы расчета.

Пусть корреляционная функция профиля

$$\rho(\tau) = e^{-\alpha\tau^2}$$

Тогда математическое ожидание числа нулей на длине L

$$E\{n_L(0)\} = \frac{\sqrt{2\alpha}}{\pi} L$$

Введем также обозначение $x = \tau\sqrt{\alpha}$. Тогда, выполнив все вычисления, предписываемые формулой (19), получим:

$$D\{n^+(0)\} = \frac{1}{4L^2} \left[\frac{\sqrt{2\alpha}}{\pi} L - \frac{2\alpha}{\pi^2} L^2 + \frac{4}{\pi^2} \int_0^{\sqrt{\alpha}L} \frac{\sqrt{\alpha}L-x}{1-e^{-2x^2}} \left\{ \sqrt{G(x)} + \frac{[2x^2-(1-e^{-2x^2})]e^{-x^2}}{\sqrt{1-e^{-2x^2}}} \operatorname{arctg}H(x) \right\} dx \right], \quad (20)$$

где: $G(x) = (1-e^{-2x^2})^2 - 4x^4 e^{-2x^2}$,

$$H(x) = \frac{[2x^2-(1-e^{-2x^2})]e^{-x^2}}{\sqrt{1-e^{-2x^2}}} G^{-1/2}. \quad (21)$$

Для реальных трасс измерения шероховатости можно принимать, что $x = \tau\sqrt{\alpha} \geq 10$. Исходя из этого, можно убедиться, что для таких значений x величины $G(x)$ и $H(x)$ принимают приближенно следующие значения:

$$G(x) = 1 \quad \text{и} \quad H(x) = 0. \quad (22)$$

Учитывая (22), выражение дисперсии числа нулей можно написать:

$$D\{n^+(0)\} \cong \frac{1}{4L^2} \left[\frac{\sqrt{2\alpha}}{\pi} L - \frac{2\alpha}{\pi^2} L^2 + \frac{4}{\pi^2} \int_0^{\sqrt{\alpha}L} (\sqrt{\alpha}L-x) dx \right] = \frac{\sqrt{2\alpha}}{4\pi} \cdot \frac{1}{L}. \quad (23)$$

Из формулы (23) видно, что дисперсия числа нулей для измерения изменяется по линейному закону. Такой же вывод получен в работах [4, 12, 13].

В работе [4] указывается, что дисперсия числа нулей изменяется приближенно при помощи следующей зависимости:

$$D\{n^+(0)\} \cong 0,114 \sqrt{\frac{2\alpha}{4\pi}} \cdot \frac{1}{L}. \quad (24)$$

Из формулы (23) получаем следующую зависимость для дисперсии:

$$D\{n^+(0)\} \cong 0,119 \sqrt{\frac{2\alpha}{4\pi}} \cdot \frac{1}{L}. \quad (25)$$

Сравнивая выражения (24) и (25), видно, что приближенная формула (23) дает несколько завышенное значение дисперсии числа нулей.

Для определения дисперсии шага S_m используем зависимость, (позволяющую определять дисперсию случайной величины y , которая является функцией других случайных величин x_1, x_2, \dots , у которых дисперсия известна [6]):

$$D\{y\} \cong \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 D_i + 2 \sum_{i=j} \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} \text{cov}(x_i, x_j), \quad (26)$$

где: $\text{cov}(x_i, x_j)$ - корреляционный момент случайных величин x_i, x_j .

В нашем случае, используя (26), получаем:

$$D\{S_m\} = \frac{D\{n^+(0)\}}{E^4\{n^+(0)\}}$$

и, следовательно:

$$D\{S_m\} = 0,456 \frac{1}{L} \Psi \frac{\pi^3 \sqrt{\pi}}{\alpha \sqrt{\alpha}}. \quad (27)$$

Дисперсия шага S_m уменьшается с увеличением трассы измерения.

Для определения дисперсии среднего шага по максимумам S_{\max} рассмотрим производную $h'(x)=g(x)$, пересечения которой с нулевым уровнем соответствуют максимумам исходного процесса. В таком случае дисперсия числа максимумов может быть определена по формуле (19). Величины $G(\tau)$ и $H(\tau)$ при корреляционной функции (11) приближенно равняются:

$$G(\tau) \square = 36\alpha^2 \quad \text{и} \quad H(\tau) \square = 0. \quad (28)$$

Таким образом, получаем следующее выражение для дисперсии, максимумов на единицу длины:

$$D\{m\} = \frac{1}{4L^2} \left[E\{m_L\} + \frac{2}{\pi^2} \int_0^L (L-\tau) \sqrt{36\alpha^2} d\tau \right] = \frac{\sqrt{6\alpha}}{4\pi} \Psi \frac{1}{L}. \quad (29)$$

Учитывая зависимость (26), получаем, что дисперсия шагового параметра определяется по зависимости:

$$D\{S\} = \frac{\sqrt{6\pi^2}}{9\alpha L \sqrt{\alpha}}. \quad (30)$$

При определении необходимого числа измерений шаговых параметров S_m и S условимся, что выборочное среднее значение параметров, полученное при экспериментальном определении, асимптотически будет иметь нормальное распределение.

При таких условиях найдем такую величину A , для которой:

$$P(|\bar{Z}-E\{Z\}|\leq \Delta)=\beta, \quad (31)$$

где: \bar{Z} - выборочное среднее значение исследуемого параметра; β - доверительная вероятность; Δ - абсолютная погрешность.

Преобразуя выражение (31), согласно [7] получаем необходимое число измерений параметра \bar{Z} при заданной погрешности:

$$n=\frac{t_{\beta}^2}{\varepsilon^2} \Psi \frac{D\{Z\}}{E\{Z\}}, \quad (32)$$

где: t_{β} - табулированная величина, зависящая от β [9]:

$$\varepsilon=\frac{\Delta}{E\{Z\}}$$

Подставив в выражение (32) дисперсию и математическое ожидание, получим необходимое число измерений шаговых параметров:

$$n_{S_m} \cong \frac{t_{\beta}^2}{\varepsilon^2} \Psi \frac{\pi}{\sqrt{2\alpha L}} \quad (33)$$

$$n_S \cong \frac{t_{\beta}^2}{\varepsilon^2} \Psi \frac{\pi}{\sqrt{6\alpha L}}. \quad (34)$$

Сравнивая формулы (33) и (34), делаем вывод, что параметр S_m требует большего числа измерений, чем S при одной и той же точности, т.к.

$$\frac{n_{S_m}}{n_S} \cong 1,7$$

Сравним необходимое число измерений для параметров R_a и S_m при одной и той же погрешности. Для этого используем интервал корреляции, поскольку установлено, что число измерений для параметра R_a пропорционально интервалу корреляции. То есть при корреляционной функции $\rho(\tau) = e^{-\alpha\tau^2}$ интервал корреляции равняется:

$$\tau_k = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{\alpha}} \quad (35)$$

Используя (35), можно записать формулы необходимого числа измерений параметров R_a и S_m следующим образом:

$$n_{S_m} \cong 0,456 \frac{t_{\beta}^2}{\varepsilon^2} \chi \frac{\pi}{L} \chi \tau_k \quad (36)$$

$$n_{R_a} \cong 0,5 \frac{t_{\beta}^2}{\varepsilon^2} \chi \frac{1}{L} \chi \tau_k \quad (37)$$

Сравнивая выражение (36), получаем, что $n_{S_m} \approx 3n_{R_a}$, то есть для определения параметра S_m необходимо измерений в 3 раза больше.

С целью проверки результатов аналитических исследований проведено экспериментальное изучение параметров нерегулярной шероховатости. Для сравнения относительной погрешности параметров R_a , S_m и S при одном и том же количестве базовых длин L была использована методика определения доверительного интервала при помощи закона распределения Стьюдента.

По полученным результатам можно сделать следующие выводы:

1. В результате аналитического моделирования получены формулы для определения необходимого числа измерений основных параметров шероховатости.

2. Сравнение полученных формул показывает, что наибольшее число измерений требует параметр S_m .

Список литературы: 1. *Миура Тейдзи*. Статистический анализ профилограмм ультра-прецизионных поверхностей. Сеймицу Кикай, J, Soc. Precis. Mech., Japan, 2007, 33, No. 12. 2. *M. Pesante*. Determination of Surface Roughness Typology by Means of Amplitude Density Curves. CIRP Annals, Vol. XII, 2. 3. *Williamson I.B.* The Shape of Solid Surfaces. Surface Mechanics. Proceedings of the ASME Annual Winter Meeting, Los Angeles, Nov.1969. 4. *Тихонов В.И.* Выбросы случайных процессов. М.: «Наука», 1970. 5. *Левин А.И., Немировский А.С.* Установление интервалов независимости между значениями отдельных функционалов.// «Измерительная техника», 1970, № 3. 6. *Смирнов Н.В., Дунин–Барковский И.В.* Курс теории вероятностей и математической статистики. М.: Физматгиз, 1965. 7. *Вентцель Е. С.* Теория вероятностей. М.: «Наука», 1969. 8. *Бендат Дж.* Основы теории случайных шумов и ее применение. М.: «Наука», 1965. 9. *Геранин В. А.* Дисперсия числа выбросов отрезка стационарного гауссовского шума.// «Радиотехника и электроника», 1967, т. 12, вып. 5. 10. *Суворов Б. М.* Дисперсия числа выбросов нормального шума. // «Радиотехника и электроника», 1971, т. 16, вып. 1.

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 предоставлены рекомендации относительно выбора рациональных материалов рабочих элементов абразивно-виглаживающих 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 поставленной цели необходимо решить следующие задачи:
– рассмотреть условия обработки;

- определить материалы рабочих элементов и их параметры;
- определить влияние зернистости на средние значения шероховатости поверхности при размерной и отделочной обработке.

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].

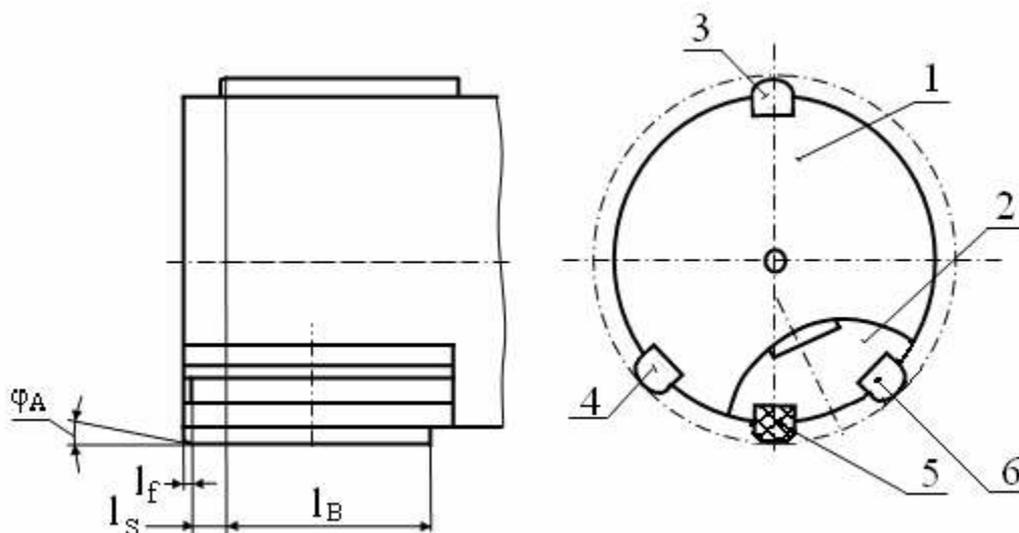


Рисунок 1 – Схема АВР: 1 – корпус АВР, 2 – поворотный блок, 3, 4 и 6 – направляющие элементы, 5 – абразивный элемент; l_f – длиной заходной фаски абразивного элемента, φ_a – угол наклона в плане заходной фаски, l_s – осевое смещение вершины абразивного элемента относительно вершины направляющего элемента, l_b – длина основной рабочей поверхности абразивного элемента.

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 $HV \leq 216$ 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 2254ВМ1Ф4. Припуск на обработку отверстий АВР с АЭ, выполненными в виде брусков до 10 мкм, а для АВГП до 20 мкм. 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.

В результате исследований установлено следующее:

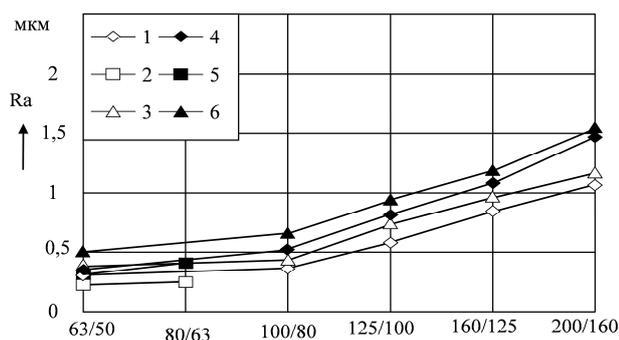
1. При обработке отверстий с припуском 10 мкм в термообработанных стальных заготовках (стали марок ШХ15, 65Г, 20Х с HRC 32 – 36) целесообразно использовать в качестве материала абразивных элементов АЭ-СГАД или АВГП-СГАД зернистостью 100/80 и направляющие элементы из поликристаллических алмазов.

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.

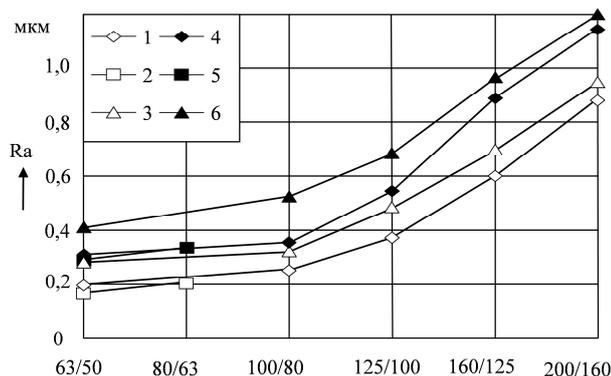
3. Использование направляющих элементов из синтетических алмазов марок АС зернистостью 14/10 с концентрацией 200 % приводит к налипанию мелкой стружки на их рабочих поверхностях при отделочной обработке в случаях, если окружная скорость развертывания V_0 превышает 0,5 м/с. В результате увеличивается шероховатость обработанной поверхности, снижается эффективность последующей

размерной обработки, а, в отдельных случаях, последующую размерную обработку вообще невозможно осуществить.

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 $V_0 = 0,5 - 1,2$ 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.



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.

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 $V_o = 0,7 - 1,2$ 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 «ХПР». – 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.

Р. С. ТУРМАНИДЗЕ, д-р техн. наук, Тбилиси, Грузия

НОВАЯ КОНСТРУКЦИЯ ВОЗДУШНОГО ВИНТА С ИЗМЕНЯЕМЫМИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ НА ОСНОВЕ ТРОСОВ И ГИДРОСИСТЕМЫ

In the Report the updating dynamics of design of the rotors with variable parameters during last 15 years at Georgian Technical University will be shown. All the positive and negative moments of each design have been analyzed and advantages of the last design based on the principle of ropes and hydro-system have been substantiated.

A promotional clip will be submitted that visually shows the work principle of the rotor itself and the stand for its tests in dynamics, the assembling process of individual complex units both in the view of animation film and practical implementation in metal.

Известно, что по принципу создания силы тяги двигателя, применяемые на летательных аппаратах делятся на винтовые и реактивные. Винтовые двигатели создают потребную, для полета летательных аппаратов, силу тяги за счет движителя – воздушного винта.

В создании теории воздушных винтов большой вклад внесли ученые разных стран: Г. Глауэрт; С. Гиллер; С.К. Джевицкий, Ф. Эриксон; Н.Е. Жуковский;

Ч. Каман; Т. Карман; И. Сикорский; Г.Х. Сабинин; А. Юнг; Б.Н. Юрьев и др.

Воздушный винт работает с высокой эффективностью до скоростей полета, соответствующих числу маха $M=0,5\div 0,6$. При дальнейшем увеличении скорости полета, явление сжимаемости воздуха на концах лопастей винта приводит к значительной потере его эффективности, что и привело к развитию реактивных двигателей.

Широкое применение воздушные винты нашли в вертолетной авиации, что повлекло к интенсивному и широкомасштабному развитию несущих винтов.

Одним из многообещающих направлений в разработке оптимальных воздушных винтов является создание воздушных винтов с изменяемыми геометрическими параметрами (ВИГ), а именно диаметра винта и крутки лопастей.

В настоящее время, в основном применяются винты фиксированного (ВФШ) и изменяемого шага (ВИШ), которые являются результатом неоптимального компромисса между требованиями режимов зависания и

высокой маршевой скоростью полета. Эти винты не решают проблему оптимизации всех этапов полета, взлет – горизонтальный полет – посадка. Было ясно, что необходимо создание ВИГ для оптимизации всех этапов полета.

ВИГ является эффективным, как для вертолетов, так и самолетов. Однако, есть основания полагать, что ВИГ будет особенно эффективным для винтовых самолетов вертикального взлета и посадки (СВВП), поскольку этот летательный аппарат действует, как в режиме вертикального взлета, так и в режиме горизонтального полета. ВИГ может дать возможность существенно увеличить взлетный вес или повысить скорость горизонтального полета обеспечением максимального диаметра и минимальной крутки в режиме висения, и наоборот, минимального диаметра и максимальной крутки при горизонтальном полете.

Несмотря на множество работ известных фирм и ученых разных стран, проблема ВИГ еще не решена. Существуют патенты, не нашедшие реального воплощения, главным образом из-за сложности и недостаточной надежности технических решений.

Следует учесть, что все эти фирмы занимались изменением какого-либо одного параметра, например, фирма «Сикорский» занималась изменением только диаметра винта, а корпорация «Боинг» – изменением только крутки лопастей.

Грузинский технический университет (ГТУ) предложил сочетание изменения диаметра и крутки во время полета.

По линии международного научно-технического центра (МНТЦ) группа специалистов ГТУ работала над проектом G-060-2 «Винт изменяемой геометрии (ВИГ) и средства его управления (узлы приводящие в действие)».

В работе также принимали участие специалисты Тбилисского авиационного акционерного общества «Тбиливиаамшени» и Тбилисского специального конструкторско-технологического бюро станкостроения. Результаты работ могут иметь применение не только в авиации, но и в ветроэнергетике, гидроэнергетике, судостроении (гребные винты) и автомобилестроении (охлаждение двигателей).

Коллаборатором проекта был Лео Дадоне, руководитель многих опытно – конструкторских работ по вертолетостроению, старший научный сотрудник, руководитель группы конструкторов, корпорации «Боинг–Роторкрафт» (США).

Первоначально на этапе анализа, на основе расчленения объекта исследования был спроектирован и изготовлен макет винта с изменяемым

диаметром, потом макет винта с изменяемой круткой лопастей. После лабораторных испытаний их основных узлов на этапе синтеза был создан винт с одновременно изменяемыми диаметром и круткой лопастей, а также стенд для его испытания (Рис.1; Рис.2; Рис.3).

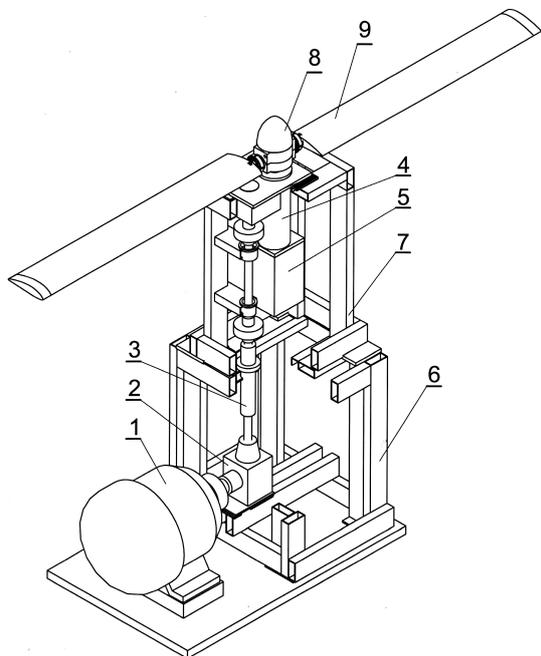


Рисунок 1 – Стенд для испытаний ВИГ: 1-Электродвигатель; 2-Редуктор; 3-Трансмиссия; 4-Втулка; 5-Редуктор; 6-Нижняя рама; 7-Верхняя рама; 8-Втулка; 9-Лопасть.

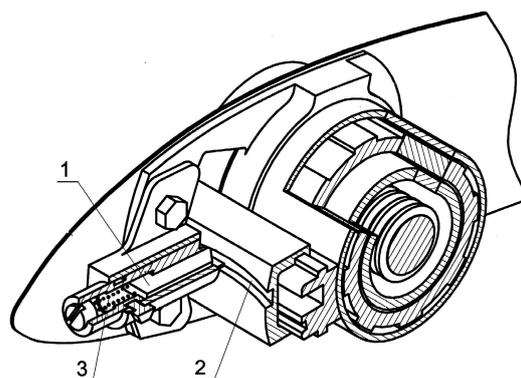


Рисунок 2 – Сочетание кончика нервюры с криволинейной направляющей:
1-Кончик нервюры; 2-Криволинейная направляющая; 3-Пружина

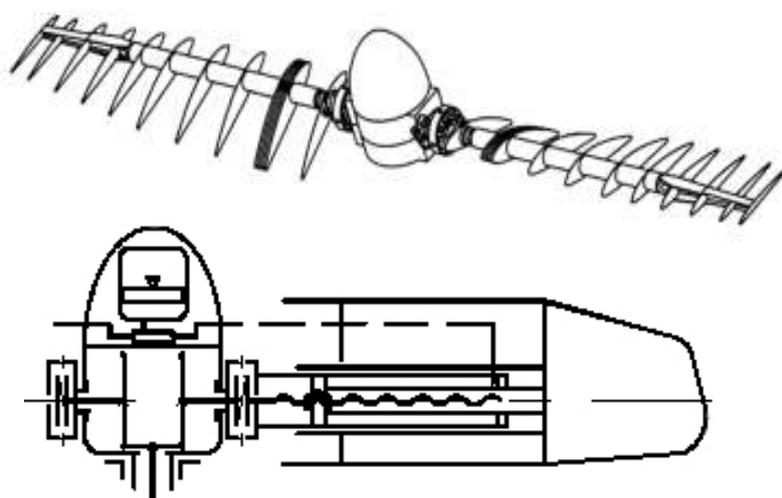


Рисунок 3 – Кинематическая схема ротора

Исследования механизмов приведения в действие винтов изменяемого диаметра и изменяемой крутки выполнялись в основном параллельно. Проектирование и изготовление стенда для испытаний на вращение так же выполнялись параллельно с работой над несущим винтом.

Разработаны основания теории проектирования ВИГ в виде классификации и процедурной модели проектирования ВИГ.

Проведенные стендовые испытания модели ВИГ показали, что при высоких числах оборотов возникают значительные центробежные силы, действующие на ходовой винт. Ходовой винт – самый нагруженный элемент конструкции несущего винта и является слабым звеном. Снижение вредного воздействия этих сил и стало весьма актуальной проблемой. Соответственно по линии МНТЦ группа специалистов ГТУ работала над проектом G-916 «Управляемый винт изменяемой геометрии с компенсацией действия центробежных сил». Коллабораторами были Жан Жакк Филипп старший научный сотрудник, почетный советник научного центра Франции «ОНЕРА», занимающегося исследованиями и разработками вертолетов и СВВП и господин Лео Дадоне.

Целью проекта G-916 была разработка системы компенсации центробежных сил. Технический подход состоял в проведении модельного эксперимента, в котором стенд стационарно закреплен на месте (Рис.4; Рис.5).

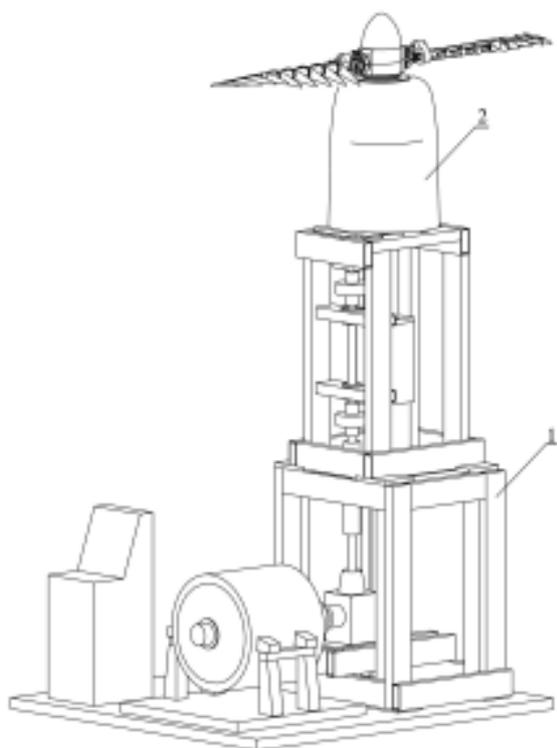


Рисунок 4 – Схема стенда динамических испытаний ВИГ



Рисунок 5 – Стенд динамических испытаний ВИГ

При вращении винта в режиме вентилятора были осуществлены измерения тяги в зависимости от изменения частоты вращения и диаметра винта. Это имитирует условия режима висения летательного аппарата. Из возможных принципов компенсации (механического, электрического, гидравлического) был выбран гидравлический, как наиболее гибкий в управлении.

Втягивание подвижной части лопасти связано с преодолением значительных центробежных сил. Величина этих сил растет в квадрате от скорости вращения. Снижение центробежных сил возможно путем кратковременного сброса скорости вращения во время изменения диаметра, что является наиболее экономным направлением. Сброс оборотов позволит снизить потребляемую мощность, в связи с чем мы можем уменьшить вес конструкции ротора, а также избежать поиска дополнительных мер компенсации центробежных сил. Однако, снижение скорости вращения ограничено фактором безопасности полета и является частичной мерой компенсации центробежных сил. Были рассмотрены различные принципиальные схемы компенсации центробежных сил, вплоть до использования балластных грузов и механических пружин, но самым оптимальным надо считать применение гидропневмоаккумулирующей системы. Поэтому для дальнейшего снижения нагрузок, предложена система компенсации содержащая гидроцилиндр и гидропневмоаккумулятор, имея целью свободное размещение гидроцилиндра и других деталей за пределами лопасти. Был произведен расчет гидравлической системы.

Результаты проекта G-916 состояли в следующем: приоритетным направлением прикладных исследований было опытное доказательство возможности хотя бы частичной разгрузки механизма изменения диаметра винта от действия центробежных сил. В системе компенсации центробежных сил была использована аккумуляция энергии действия центробежных сил в гидропневмоаккумуляторе во время раздвижения лопастей, с последующим его использованием для частичной разгрузки механизма изменения диаметра винта при сдвигении лопастей. Было разработано несколько конструктивных вариантов системы, из которых с учетом мнений коллабораторов был выбран и изготовлен оптимальный. Была доказана синхронность функционирования ВИГ-а.

На конструкцию этого варианта ВИГ-а получен Европатент Application No/Patent No 08737551.5 - 2422 PCT/IB2008001041. В настоящее время патентуется в США. Все финансовые расходы патентования взяла на себя Евросоюз.

Безопасность динамических испытаний ВИГ-а была обеспечена безотказностью узлов ВИГ с системой компенсации. Для оценки безотказности был сконструирован и изготовлен стенд статических испытаний (Рис. 6; Рис. 7) на котором были экспериментально имитированы нагрузки, действующие при различных частотах вращения винта. Были определены линии упругости лопасти в зависимости от имитируемых частот вращения при сдвинутой и раздвинутой лопасти, а также зависимости усилий на рычаге управления стендом от имитируемых частот вращения.

Эксперименты, на стенде динамических испытаний, были проведены методом замера скорости воздушного потока крыльчатым анемометром (Рис. 8), который для данной задачи характеризовался достаточной повторяемостью результатов измерений.

Исследовано распределение индуктивных скоростей воздушного потока вдоль размаха лопасти винта (Рис. 8 и 9) и определена зависимость тяги ВИГ от частоты вращения при минимальном и максимальном диаметрах винта.

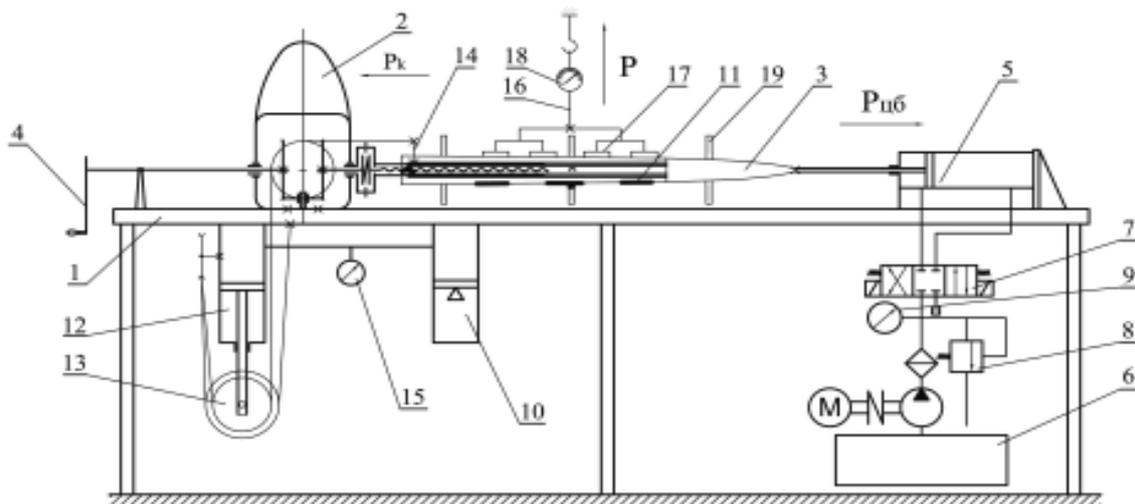


Рисунок 6 – Схема стенда статических испытаний ВИГ:

- 1-Рама, 2-Втулка, 3-Лопасть, 4-Рукоятка, 5-Гидроцилиндр, 6-Гидростанция, 7-Гидрораспределитель, 8-Обратный клапан, 9-Манометр, 10-Гидроаккумулятор, 11-Лонжерон, 12-Гидроцилиндр, 13-Полиспаст, 14-Кронштейн, 15-Манометр, 16-Стержень, 17-Накладка, 18-Динамометр, 19-Линейка.

Установлено, что в случае увеличения диаметра винта в 1,4 раза и изменения кривизны лопасти в пределах $16 \div 180$ обеспечивается повышение силы тяги примерно, в 1,6 раз (Рис. 9).

Эффективность системы компенсации доказана многократным безотказным сдвижением - раздвижением лопасти винта во всем диапазоне

изменения частот вращения. Это обусловило синхронность функционирования ВИГ-а.



Рисунок 7 – Стенд статических испытаний ВИГ

Результаты работ по обоим проектам доложены и одобрены на авторитетных международных научно-технических конференциях, запатентованы и опубликованы в научных статьях. В Грузии и Румынии издана монография на русском и английском языках.

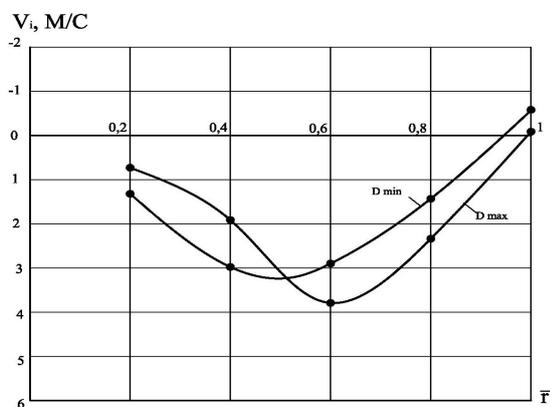


Рисунок 8 – Схема распределения индуктивных скоростей вдоль размаха лопасти для разных диаметров воздушного винта.

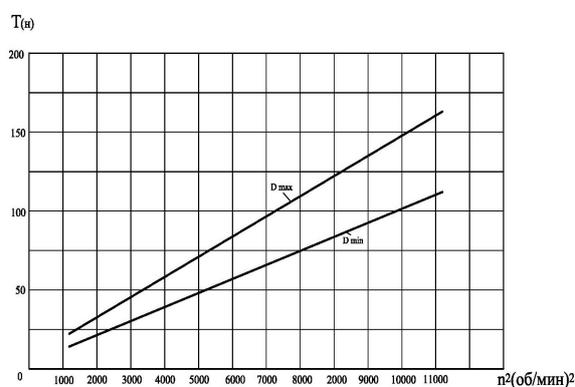


Рисунок 9 – Схема зависимости тяги ВИГ-а от частоты вращения винта для случая угла установки лопасти $\varphi_{0,75}=15^{\circ}$.

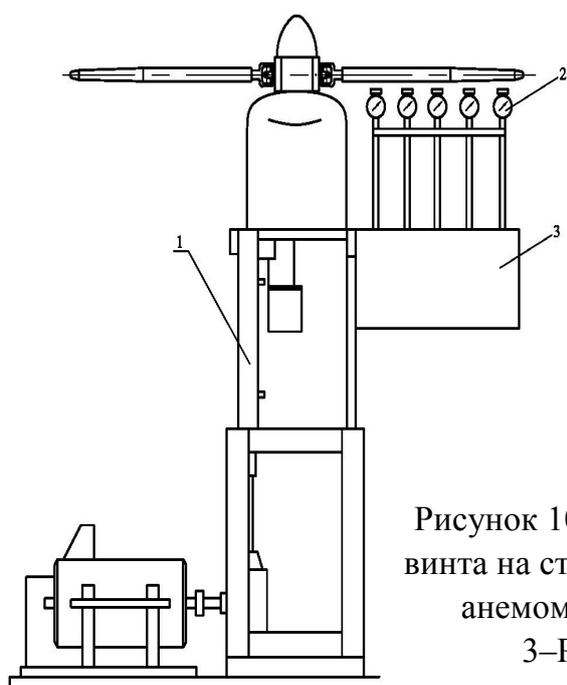
Коллабораторами проектов было предложено, что для дальнейшего увеличения эффективности использования ВИГ-а, особенно для маленьких самолетов, целесообразно упрощение механизма изменения диаметра и увеличение диапазона изменения крутки лопастей до $30\div 35^{\circ}$.

Исполнителями проекта было предложено несколько конструктивных вариантов для решения этой задачи.

МНТЦ на основании поддержки коллабораторов профинансировал это предложение и первым коллаборатором нового проекта МНТЦ G-1600 является господин Джузеппе Паньяно - начальник координации научно исследовательских новшеств, менеджер по защите интеллектуальной собственности фирмы «Агуста Вестланд» Италия, а вторым коллаборатором - господин Лео Дадоне.

Из за того, что господин Джузеппе Паньяно переведен на административную работу в г. Брюсселе после чего он не имеет право быть коллаборатором, в настоящее время ведутся переговоры с профессором Миланского технического университета господином Марко Борри для замены господина Дж. Паньяно. Принципиальное соглашение уже имеется.

Из предложенных конструктивных вариантов на основе консультации с коллабораторами а также с другими компетентными специалистами работающих в области авиации, был выбран более оптимальный и в условиях Грузии наиболее реализуемый вариант. Сущность этого варианта заключается в том, что втулка и лопасти освобождены от всяких лишних деталей и узлов и остался только трос, концы которого закреплены на движущихся частях лопастей (Рис.10). Сама лопасть, с целью свободного осуществления крутки, состоит из гибких элементов, которые закреплены между нервюрами (Рис.10; Рис.11 и 12).



Анемометр крыльчатый АСО-3

Рисунок 10 – Схема установки для измерения тяги винта на стенде путем замера скоростей с помощью анемометров. 1-Стенд ВИГ, 2-Анемометры, 3-Рама для установки анемометров.

При увеличении оборотов воздушного винта, за счет возникших центробежных сил, движущиеся части лопастей раздвигаются и диаметр винта увеличивается. Для уменьшения диаметра, поршень и шток гидроцилиндра перемещаются в нужном направлении и с помощью тросов диаметр винта уменьшается.

При увеличении или уменьшении диаметра с помощью специальных механизмов каждая нервюра, в каждый момент, занимает заранее рассчитанное угловое положение вокруг неподвижного лонжерона, чем обеспечивается максимальная крутка лопастей при минимальном диаметре и наоборот, минимальная крутка при максимальном диаметре винта.



Рисунок 11 – Лопасть с гибкими элементами

Этими же механизмами крутки сохраняется стабильность формы лопастей при вращении винта, т.е. при действии на лопасти значительных центробежных и подъемных сил.

На эту конструкцию получен Грузинский патент и готовятся документы для Европейского патента, на финансирование которого имеется согласие руководителей Евросоюза.

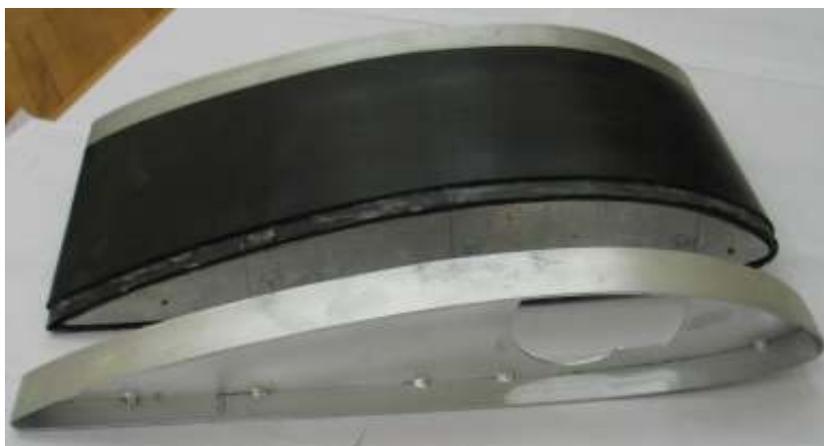


Рисунок 12 – Гибкий элемент лопасти и нервюра

В течении первого года, согласно рабочего плана проведен подробный анализ существующих литературных данных, осуществлены необходимые аэродинамические и прочностные расчеты, составлены технологические карты изготовления всех ответственных деталей, параллельно были изготовлены детали и узлы, осуществлена модернизация стенов для статических и динамических исследований соответственно новой конструкции винта, проведены предварительные испытания лопастей на стенде статических испытаний и подготовлен стенд динамических испытаний для проведения подробных экспериментов (Рис. 13).



Рисунок 13 – Стенд динамических испытаний

По разработанной методике в предыдущем проекте будет определяться скорость воздушных потоков в разных сечениях лопастей и с помощью известных зависимостей определяется характер распределения подъемных сил вдоль лопастей при разных диаметрах ротора и величины крутки лопастей.

Последовательность работы новой конструкции в соответствии с основными этапами имитации полета осуществляется следующим образом (Рис. 14).

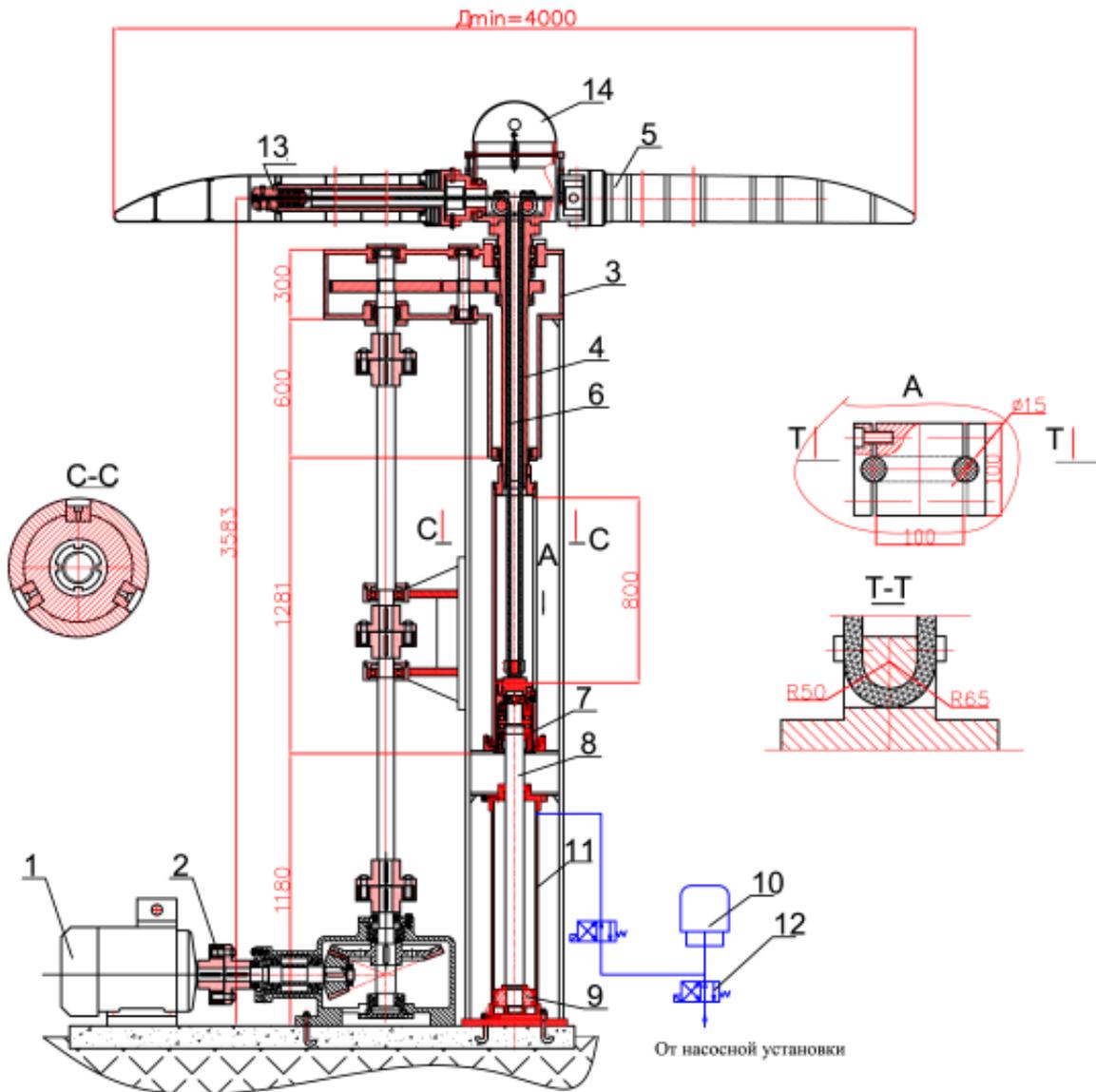


Рисунок 14 – Схема станда:

- 1-Электродвигатель постоянного тока, 2-Конический редуктор,
 3- Цилиндрический редуктор, 4-Шпindel цилиндрического редуктора,
 5-Лопасть с гибкими элементами, 6-Трос, 7-Узел подшипников с корпусом,
 8-Шток, 9-Поршень, 10-Гидропневмоаккумулятор, 11-Гидроцилиндр,
 12-Гидрораспределитель, 13-Узел крепления троса, 14-Втулка.

В начале, при пуске главного двигателя 1 через конический редуктор 2 и цилиндрический редуктор 3 вращение передается на корпус втулки 14 и кинематически связанным втулкой с остальными элементами системы управления. При включении системы вращения лопастей 5 и повышения числа оборотов возникают центробежные силы и лопасти автоматически начинают раздвигаться. При раскрытии, движущиеся части лопастей, втягивают за собой трос 6, корпус подшипников 7 и шток 8 с поршнем 9.

В результате масло, помещенное в гидроцилиндре под давлением перетекает в гидропневмоаккумулятор 10. Система спроектирована таким образом, что при достижении заранее рассчитанной величины оборота ротора, поршень перемещается в крайне верхнее положение, лопасти дойдя до крайнего положения под действием центробежной силой фиксируют максимальный диаметр ВИГ-а.

После достижения максимального диаметра ротора и необходимого значения количества оборотов, аккумулятор 10 отклоняется от гидроцилиндра 11 гидрораспределителем 12 и подключается к гидростанции для стабилизации давления, которое необходимо для осуществления сдвигания лопастей. После этого осуществляется подготовка параметров ротора для эффективного и экономичного уменьшения диаметра ротора до минимального значения и увеличения крутки лопастей до их максимальных значений.

Для этого включается гидрораспределитель 12 и масло с соответствующим давлением от аккумулятора 10 подается через трубопровод, гидрораспределитель 12 и в рабочую полость цилиндра 11. В результате шток 8 с поршнем 9 перемещается вниз втягивая за собой корпус подшипника 7 и трос 6 осуществляет уменьшение длины лопастей. Сдвигание лопастей заканчивается после опускания поршня 9 до нижнего крайнего положения.

Подготовлен рекламный ролик показывающий последовательность процесса сборки отдельных ответственных узлов, а также принципа их работы как в анимационном режиме так и на реальной конструкции ротора и стенда для динамических испытаний.

Заключение

1. Для определения эффективности использования ВИГ-а, взамен винтов с фиксированными геометрическими параметрами, проведены аэродинамические расчеты и установлены оптимальные пределы изменения диаметра винта и соответствующий диапазон изменения крутки лопастей.

2. Сконструирована и изготовлена конструкция ВИГ-а с упрощенным механизмом изменения диаметра на основе тросов, гидросистемы и с расширенным диапазоном крутки лопастей.

3. С целью экспериментального воспроизводства действия подъемных и центробежных сил на узлы ВИГ модернизирован существующий стенд статических испытаний.

4. Существующий стенд динамических испытаний модернизирован с добавлением необходимых узлов для изменения диаметра и крутки лопастей ВИГ-а новой конструкции, при разных оборотах.

5. Разработана методика модельных испытаний на модернизированном стенде динамических испытаний.

6. Подготовлена методика по определению силы тяги измерением скорости воздушного потока при разных частотах вращения ВИГ с изменением основных параметров: диаметра, шага и крутки.

Список литературы: 1. Свишев, Тяга винта, Авиация: Энциклопедия. /Гл.ред. Г.П. М.: БРЭ, 1994 г., 736 с. 2. *Анимица В.А., Головкин В.А., Крайнов М.В., Новак В.Н., Тарасов Н.Н., Щеглова В.М.* Расчетно-экспериментальные исследования полей индуктивных скоростей за несущим винтом на аэродинамические характеристики рулевого винта на малых скоростях полета вертолета при боковом ветре. ЦАГИ. Москва. VI форум Российского вертолетного общества. Февраль 2004 г. 3. *Турманидзе Р.С., Дадоне Л., Санадзе Г.О.*, Повышение летно-технических характеристик летательных аппаратов путем применения винта изменяемой геометрии». Материалы V форума Российского вертолетного общества. Москва 2002. с VI 39-VI 48. 4. *R.S.Turmanidze, L.Dadone, J.J.Philippe, B.Demaret*, Investigation, Development and Tests Results of the Variable Geometry Rotor. 33rd European Rotorcraft Forum. Kazan, 10–14 September 2007, Pages 11. 5. *R.S. Turmanidze, L.Dadone, S.N.Khutsishvili*, Design and Experimental Investigation of Variable-Geometry Rotor Concepts PA Presented at: Adaptive Structures and Material Systems Symposium, International Mechanical Engineering Congress and Exposition November 11-16, 2001, New York, N. 6. *Dadone L.; Liu J.; Acree C.* Proprotor Design Issues for High Speed Tiltrotors. Boeing Defense & Space Group, Helicopter Division. NASA Ames Research Center. Presented at the 50 th Annual Forum of the American Helicopter Society, Washington, DC, May 1994. p.21. 7. *T.Prabhakar, F.Gandhi, J. Steiner, D. McLaughlin.* Centrifugal Force Actuated Variable Span Morphing Helicopter Rotor. AHS Forum Penn State Papers May 1-3, 2007, pages 15. 8. *J. C. Walchko, J. Kim, K. Wang, E.C. Smith*, Hybrid Feed forward-Feedback Control for Active Helicopter Vibration Suppression. The Pennsylvania State University, University Park, PA 16802. AHS Forum Penn State Papers May 1-3, 2007.

M. HORVATH, Prof., *J. NYIRŐ*, Budapest, Hungary

MICROMACHINING OF MICRO AND NANO-STRUCTURED METALS

The microstructure of machined metals change near the tool affected zone. This paper presents some new results concerning mirror-like surface cutting of aluminum and copper. The microstructure of aluminum and copper represents the polycrystalline mild metals with face centered cubic (fcc) crystal lattice. The examination of mirror-like surface by optical microscopy, scanning electron microscopy, electron backscattered diffraction (EBSD) and atomic force microscopy show the grain boundaries and twin boundaries, which separates two domains for different crystal orientation. Young's modulus that depends on orientation can change considerably on these boundaries, consequently the value of elastic deformation of the layer under machined surface. This effect modified the roughness too. Aluminum and copper were cut as "conventional" micro-structured metals used in everyday practice and after so called ECAP process with nano-crystalline structure, for examining effects of crystal size on machinability and surface integrity of machined mirror surfaces. Results of these comparative experiments are discussed in this paper.

Keywords: ultraprecision machining of mirror-like surfaces, copper, aluminum, crystal, micro and nanostructure, dislocations, anisotropy, crystal orientation, surface integrity.

INTRODUCTION

Developments in the engineering industry and the high quality of its products make it necessary the continuous improvement of the manufacturing processes involved and their economic efficiency.

Owing to the increased accuracy and quality of machined parts, investigations of the effect of cutting on the base material structure and its mechanical properties become absolutely necessary. It is well known, that material is plastically deformed under a cut surface and therefore its properties have changed. The effect of the material and its microstructure on the surface finish is especially strong when cutting ultraprecision mirror like surfaces. Mirror surface structural changes, such as grain boundaries on embedded phases, different orientations and anisotropy, may be observed leading to uneven surfaces. Deviations in materials structure always occur on the cut surface and therefore it is absolutely essential to investigate their effect, when machining very fine surfaces [5].



Figure 1 – Microcut surface by microscope (500X)

During ultraprecision cutting, due to very small chip sections, very often single crystals are cut. There is much research on single crystals that demonstrates that the chip undergoes much bigger and inhomogeneous plastic deformation than the cut surface layer, while plastic deformation takes place in some determined layers of the material. (Fig.1)

Machining of micro structured copper and aluminum for analyzing effects of anisotropy, crystal lattice and mechanical behavior of different materials cutting experiments was made. The Al and Cu specimens were fixed on a disk on a dia 160 mm in the chuck of the lathe, so the traces of the tool paths could be considered as parallel straight lines.

When machining mirror like surfaces the bigger the anisotropy of the modulus of elasticity of the material, the greater surface roughness is. However, the surfaces integrity is affected not only by the anisotropy of crystalline structure but also by all the parameters of plastic deformation involved. Therefore, the determination of structural changes occurring during ultra precision machining, together with the increased temperature in the machined surface layer may be useful for estimating the surface integrity of machined component.

The work utilized in cutting is a function of the plastic deformation of the material. Elastic deformation vanishes when the cutting tool moves away and the temperature increase. About 10% of the work spent for plastic deformation results in an increase in dislocations density, while the rest is used in increasing the temperature.

FORMATION OF SURFACE ROUGHNESS IN MICROTURNS AT COPPER

Two important material properties of copper are its cubic face-centered atomic lattice structure, and intense anisotropy. The elastic or Young modulus of copper is changing from $E = 66.71 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2$ to $E = 192.33 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2$ depending on the orientation of crystal planes. The smallest value can be measured in the $\langle 100 \rangle$ direction, while the largest value is in the $\langle 111 \rangle$ crystallographic direction. The variation of other mechanical material properties,

SURFACE OF COPPER SPECIMENS

On the Fig. 3 etched macroscopic image of original state of the soft copper specimen is shown. In internal parts of its crystallites twins with parallel boundaries could be observed. Twins seen in the domain marked E is shown on Fig. 4 made by EBSD techniques. In the unit triangle of the stereographic pole figure, which is seen on Fig. 5 identically marked poles of different domains (grains or twins) show their surface normals. On the Fig. 6 one can see surfaces of Fig. 4 marked identically, showing clearly that tool, crossing crystal domains with different orientations changes the surface roughness to a less extent. As a result metallographic features become observable without any usual preparation only under effect of Nomarski differential interference contrast mode (N-DIC) of optical microscopy [13, 15].



Figure 3 – Macroscopic image of original state of the annealed copper specimen.

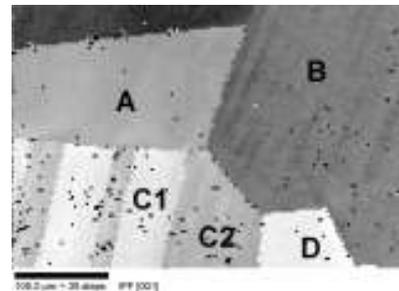


Figure 4 – EBSD image quality map of the detail E on the Fig. 2.

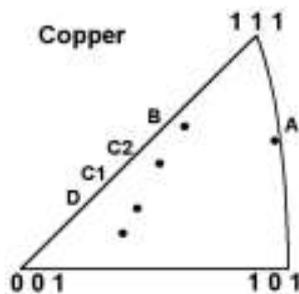


Figure 5 – Pole figure showing orientation of crystallites and twins marked on Fig. 3.

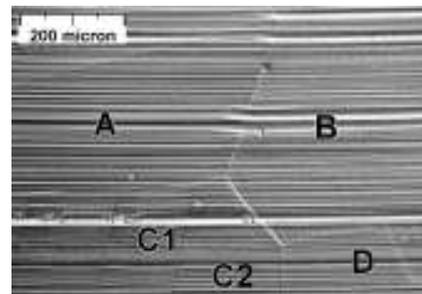


Figure 6 – N-DIC image of detail showing on Fig. 3 after ultra precision machining.

Fig. 7a made on mirror-like surface of copper specimen demonstrates, that the trace of the tool changes in every case, when it crosses grain or twin boundary with changing crystallographic properties of domains to be machined. On the Fig. 7a tool, moving from right to left, crosses at first a crystallite, then in the new crystallite it cuts the surface of a twin, making observable its both boundaries. Fig. 7b made by atomic force microscopy (AFM) shows the 3D plot of a grain boundary on mirror cut surface of copper [16].

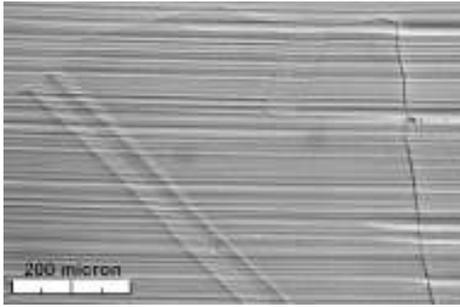


Figure 7a – N-DIC image of twin boundaries and grain boundaries on mirror cut surface

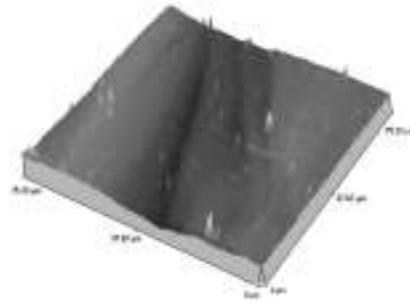


Figure 7b – 3D plot of a grain boundary on mirror cut surface

We get similar results with Al. Size, orientation and moduli E and G have determinative effect on surface integrity during the machining.

EXPERIMENTS WITH NANO-STRUCTURED METALS

The cutting experiments were made with nano-crystallines Al, Cu and Steel. Nano-crystallines structure was achieved as results of high rate of plastic deformation. In this paper authors deal only with experiments on Al. For achieving nano-structure the equal-channel angular pressing method was applied.

Equal-channel angular pressing (ECAP) is a processing method in which a metal is subjected to intense plastic straining through simple shear without any corresponding change in the cross-sectional dimensions of the sample. This procedure may be used to create ultra fine grain sizes in bulk polycrystalline materials.

Equal-channel angular pressing (ECAP) is a processing method in which a metal is subjected to intense plastic straining through simple shear without any corresponding change in the cross-sectional dimensions of the sample. This procedure may be used to create ultra fine grain sizes in bulk polycrystalline materials. The principles of the ECAP process have been examined with reference to the distortions introduced into a sample as it passes through an ECAP die with special attention to the effect of rotating the sample between consecutive passes. Significant distortions of the grain structure occurred when a sample passed through a standard ECAP die, so when a sample is pressed repetitively through the die, it has been recognized that the overall shearing characteristics within the crystalline sample may be changed by a rotation of the sample between the individual passes. The repetitive pressing of the same sample is generally carried out in order to attain very high imposed strains. At the same time there is an opportunity to rotate the sample between consecutive pressings in order to activate different shear planes and directions, thus enhancing the mechanical properties at room temperature by applying different routes [9, 10].

It is well known that plastic deformation induced by conventional forming methods can significantly increase the strength of metals. However, this increase is usually accompanied by a loss of ductility. It has been found recently that materials processed by ECAP after certain number of passes show high ductility along with high strength. Such unusual behaviour of materials, which is in contradiction with 'classic' tendencies to lost ductility with increased strength, needs to be understood deeper. In this paper the effect of different routes of ECAP techniques on the strength and the ductility of an Al-based alloy is investigated. The mechanical behaviour is related to the characteristic features of the nano-crystalline microstructure formed during ECAP deformation [11].

The material used in this study was a commercial Al-Mg-Si alloy (Al 6082). The main components of the alloy are Al (97%), Si (0.7–1.3%), Mg (0.6–1.2%) and Mn (0.4–1%). Before the ECAP deformation, the material was annealed at 420°C for 40 minutes. Specimens in this condition were regarded as the as-received material. Cylindrical billets of 15 mm in diameter and 145 mm in length were pressed through the ECAP die with 90°C intersecting channels. Four and eight passes were completed by the following routes: BC (rotation of the billet around its longitudinal axis after each pass by 90°C clockwise), BA (rotation of the billet around its longitudinal axis after each pass by 90°C clockwise and counterclockwise, alternatively) and C (rotation of the billet around its longitudinal axis after each pass by 180 °C, clockwise). The temperature of deformation was 293 K and the displacement rate of the billet was 8 mm/min [12, 14].

It was found that nano-sized microstructure (mean crystallite size ~ 80 nm) with high dislocation density ($3 \times 10^{14} \text{ m}^{-2}$) was achieved even after the first pass. The microstructure was refined only slightly during further ECAP passes. At the same time the dislocation density increased with the increase of ECAP deformation up to 4 passes. The dimensionless dislocation arrangement parameter, M , has a value of 4.0 ± 0.4 for the as-received specimen and it decreased to 2.2 ± 0.3 after 8 ECAP passes. This indicates that the dipole character of the dislocation structure became stronger with increasing deformation.

SURFACE INTEGRITY MEASUREMENT

The effect of crystal size and the ECAP process on the surface integrity was investigated by making mirror-like cylindrical and flat surfaces, using turning. An ultra-precision lathe (Csepel UP-1) and Winter mono-crystalline diamond tool were used in these experiments.

The turning process has been applied to every specimen with the same cutting conditions.

The set machining parameters were:

cutting speed (v_c) 78 m/min
 feedrate (f) 5 $\mu\text{m}/\text{rev}$
 cutting edge radius (r_β) 50 nm.

The sample surfaces, prepared by ultra-precision machining, demonstrated interesting changes. The original surface quality was nearly identical to that after the fourth pass. After eight passes, however, the surface roughness dropped by a factor of five, further reflecting the effect of the structural changes. In turning experiments after eight steps of pressing – under equal cutting conditions – cut surface roughness reduced by a factor of five on average (from $Ra = 55$ to $Ra = 10$).

The results can see on the next table (Table 1).

Table 1 – Forming of surface roughness in function of ECAP number

No. of ECAP	Average surface roughness (Ra , nm)	Surface roughness, (Rz , nm)
0	49,6	283,1
1	54,8	402,9
4	53,3	272,7
8	9,5	70,87

Surface roughness was measured with Atomic Force Microscope (Fig. 8). The results are very interesting and very promising: surface finish of the cut raw part had the same value.

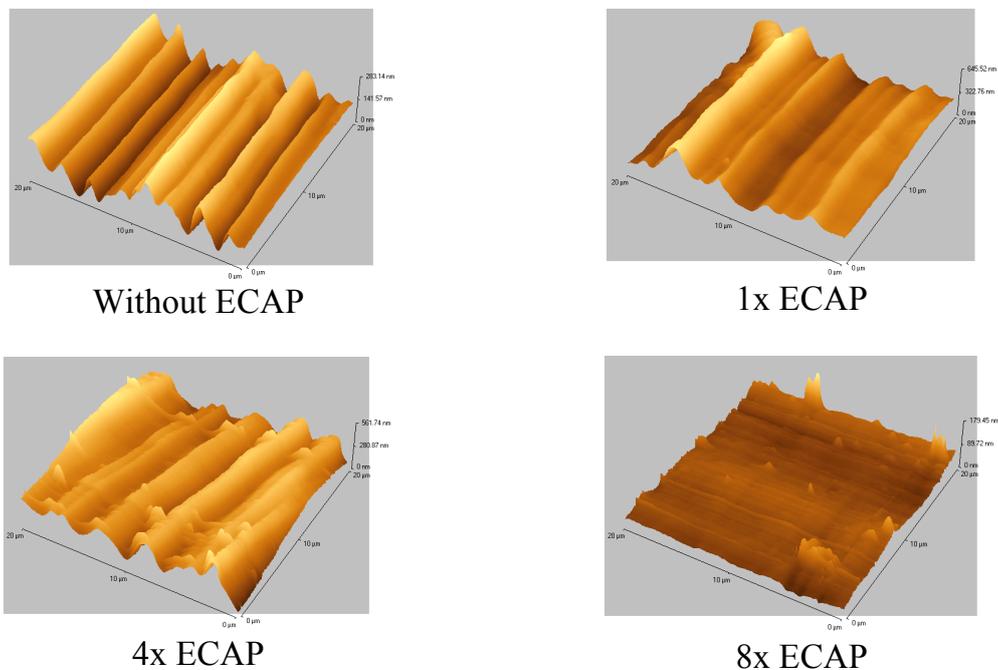


Figure 8 – Microscopy exposures in function of ECAP number

CONCLUSIONS

For getting mirror like surfaces with nanometer size parameters of surface integrity one have to eliminate the influence of crystal orientation, different moduli of elasticity, anisotropy. The only possibility is to decrease the sizes of crystallines up to 100nm. They should be less, then active edge of cutting tool. In this case the tool edge is crossing many crystallines in one pass (feedrate is several μm), and influences of different crystals neutralize those of each other.

References: 1. *Moriwaki, T. Okuda, K.* (1989), Machinability of Copper in Ultra-Precision Micro Diamond Cutting, *Annals of the CIRP*; 2. *Spenrath, N.M.*, (1991), *Technologische Aspekte zum Feinstdrehen von Kupferspiegeln*, Diss. RWTH Aachen; 3. *Prohászka, J.*, (1997), The Effects of the Anisotropy of Young's Modulus on the Beginning of Plastic Deformation, *Proceedings of IMMM '97*, Mie University Press; 4. *Von Turkovich BF, Black JT* (1970), Micro-machining of Copper and Aluminium Crystals, *J. Eng. Ind.* 92; 5. *Komanduri, Chandrasekaran RN, Raff LM*, (1999), Orientation Effects in Nanometric Cutting of Single Crystal Materials: An MD Simulation Approach." *Annals of CIRP*; 6. *Grabchenko A, Horváth M, Mamalis AG, Mészáros I, Paulmier D*, (1999), *Ultraprecision Machining of Mirror-Surfaces*. OSIN'99, Krakow; 7. *Mamalis AG, Prohászka J, Mészáros I*, (2000), The Effect of the Anisotropy of the Material on the Surface Topography in Case of Ultraprecision Machining, 1stEUSPEN Topical Conference on Fabrication and Metrology in Nanotechnology, Copenhagen; 8. *Nyirő J, Mamalis AG, Prohászka J, Mészáros I*, (2001), Analysis of Ultraprecision Turned Mirror Surfaces, EUSPEN 2nd International Conference, in Turin; 9. *J.Gubicza, Gy. Krállics, I. Schiller, D. Malgin* (2005), Evolution of the microstructure of al 6082 alloy during equal-channel angular pressing, MATERIALS SCIENCE FORUM; 10. *Gy. Krállics, D. Malgin, A. Fodor*, (2005), Experimental investigations of the al 6082 alloy subjected to equal-channel angular pressing, MATERIALS SCIENCE FORUM; 11. *M Takács, I Mészáros, B Verő, Gy Krállics, J Dobránszky, T Törköly*, (2007), Machining of Ultra-Fine Grained Materials. In: VI. Hungarian Materials Science Conference. Siófok; 12. *J. Gubicza, N. Q. Chin, Gy. Krállics, I. Schiller, T. Ungár*, (2006), Microstructure of ultrafine-grained fcc metals produced by severe plastic deformation, CURRENT APPLIED PHYSICS; 13. *J. Prohaszka, J. Dobranszky, J. Nyiro, M. Horvath, A. Mamalis*, (2004), Modifications of surface integrity during the cutting of copper, MATERIALS AND MANUFACTURING PROCESSES; 14. *Gy. Krállics, M. Horváth, J. Nyirő*, (2006), Forming and machining of the nanocrystalline alloys, In: International conference on multi-material micro manufacture (4m). Grenoble; 15. *J. Prohaszka, M. Horvath, A. Mamalis, J. Nyiro*, (2006), Effect of cutting tools and cut materials on integrity of mirror surfaces, SURFACE ENGINEERING; 16. *J. Prohaszka, A. Mamalis, M. Horvath, J. Nyiro, J. Dobranszky*, (2006), Effect of Microstructure on the Mirror-Like Surface Quality of FCC and BCC Metals, MATERIALS AND MANUFACTURING PROCESSES 21.

ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ

УДК 620.179.5

N. V. VEREZUB, prof., Kharkiv, Ukraine,
G. KAPTAY, prof., Miskolc, Hungary,
A. A. SYMONOVA, Kharkiv, Ukraine

THE MANAGEMENT OF SURFACE QUALITY OF METAL WITH NANO AND SUBMICROCRYSTALLINE STRUCTURE DURING MACHINING

Розглянуті особливості поведінки нано- та субмікросталічних металів, отриманих методом інтенсивної пластичної деформації, під впливом температурного чинника, виникаючого у процесі механічної обробки заготовок. Представлена послідовність дій для отримання раціональних умов обробки, які забезпечать збереження вихідної структури металу та високу якість поверхневого шару після механічної обробки. Запропоновані раціональні умови обробки для деяких металів з нано та субмікросталічною структурою.

Рассмотрены особенности поведения нано- и субмикрокристаллических металлов, полученных методом интенсивной пластической деформации, под воздействием температурного фактора, возникающего в процессе механической обработки заготовок. Представлена последовательность действий для определения рациональных условий обработки, которые обеспечат сохранение исходной структуры металла и высокое качество поверхностного слоя после механической обработки. предложены рациональные условия обработки для некоторых металлов с нано- и субмикрокристаллической структурой.

The behaviour features of the nano- and submicrocrystalline metals affected by the temperature factor incipient during cutting are considered. The metals are processed by methods of severe plastic deformation. The operations consistency in order to get the rational machining conditions is presented. The rational machining conditions will ensure the conservation of the initial metal structure and high workpiece surface quality after cutting. The rational machining conditions for the same metals with nano- and submicrocrystalline are suggested.

From the broad spectrum of all nanomaterials only bulk nano- and submicrocrystalline metals are considered in this paper. These metals are processed by methods of severe plastic deformation (SPD) [1].

Some research [1-5] has shown that the mechanical characteristics of the nanocrystalline metals essentially differ from macrocrystalline metals. The practical interest is the high strength properties of nanostructure metals, such as strength, microhardness, increased damping capacity etc.

The bulk nanocrystalline and submicrocrystalline metals are used in medical, aircraft and auto engineering industries [1, 6].

The nano- and submicrocrystalline metals, got by SPD, differ in instability structures. The observed grain growing can be explained by high internal tensions. The sources of tension are nonequilibrium of a boundary grain and a crystalline lattice distortion [1]. The temperature of a grain growth beginning ($0,2-0,3T_m$ [7, 8]) in nano- and submicrocrystalline metals is lower than in macrocrystalline metals. Complex structured changes occur with the

development of the processes of the return, recrystallization, growing grain and loss of high physical-mechanical properties in the nanocrystalline metals at heating [1, 9]. The intensity of the recrystallization process, resulted in grain growing, is determined by degree and time of the thermal action.

Usually, manufactured parts are made by means of the cutting.

Cutting is a complex process of plastic deformation. It is accompanied by intensive heat generation with significant stress in zone of the contact "instrument – work material" [10].

The physical state (structure, properties) and surface tension of a part are result of elastic-plastic deformation and local heating in a cutting zone. The heat occurs during plastic deformation and external friction of working surfaces of the cutting tool on the work material. The heat has a great influence on the physical state of the surface.

Large contact area on the front surface of the tool is characterized for fine metals. This leads to the considerable efforts of friction. Small value of a shear gives the increase of cutting speed and temperature in the cutting zone. The temperature in the cutting zone for technically fine nickel, titan and copper are 973, 873 and 573 K respectively [11].

It can be hypothesised that temperature in the cutting zone and time of the temperature influence, will cause the grain growth and reduction of physical-mechanical properties of the nano- and submicrocrystalline metals.

The experimental data have confirmed the influence of the temperature and the time factor on grain growth and change of the physical-mechanical properties of the nano- and submicrocrystalline metals. The change of the physico-mechanical properties results in deterioration of performance of the nano- and submicrocrystalline metals.

The main requirement for the formation of the parts is the preservation of the initial submicrocrystalline or nanocrystalline structure of the workpiece. The properties of the metal shouldn't change under the influence of deformation-thermal phenomena during machining.

The force and temperature are main physic factors influencing changes in the structure of the nano- and submicrocrystalline metals. The role of these factors is necessary to determine to find the rational conditions of machining of the nano- and submicrocrystalline metals.

The operations consistency of surface integrity management of metals with nano- and submicrostructure has been developed.

The consistency of workpiece surface quality consists of the following stages:

1. The workpiece with the known initial grain size is chosen.
2. The maximal temperature in the workpiece, time of influence of this temperature and penetration depth of the maximal temperature is determined. For this purpose the model of calculation of the thermal fields is used. The

necessary data are a tool material, cutting conditions and number of cutter passes. (The maximal temperature arises in the workpiece and causes structural changes of metal. The time of the maximal temperature influence defines intensity of grain growth and depends on the feed value).

The finite-element modelling of the allocation of temperature fields in a workpiece is performed using the program package ANSYS 8.0.

The value of the heat flow coming from the instrument in the workpiece and the heat transfer coefficient of the workpiece with the environment is found. These data are calculated based on the algorithm for calculating heat flows proposed A. N. Reznikov [12].

The intensity of heat current, heat-transfer coefficient and the thermal characteristics of work metal (thermal conductivity, specific heat) are put in the model. The allocation of temperature fields in a workpiece and the intensity of heating the workpiece to a depth of the surface layer are found by finite-element modelling.

3. The coarsening transport coefficient is determined. The values of coefficient lie in an interval of the calculated boundaries considering nano- and submicrocrystalline metal from a position of crystal and amorphous properties.

The rate constant of coarsening (k) is derived by supposing the grain boundary is crystalline (1):

$$k_c \cong A \frac{T_m}{T} \exp\left(-B \frac{T_m}{T}\right), \quad (1)$$

with $A = (1.3 \pm 0.5) 10^{-4}$ (m^2/s), $B = p + z$, with $p = 14$ (bcc), $p = 17$ (fcc and hcp) and $p = 21$ (for dc, such as Ge, Si)), while z - the valence of the metal, T_m - melting point of metal (K).

The equation parameter k , supposing that the grain boundary is fully amorphous (2):

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

with the molar volume (3) expressed as [13]:

$$V_m = V_m^o [1 + \beta(T - T_m)] \quad (3)$$

with M - , atomic mass (kg/mol); T_m - melting point of the metal (K), V_m^o - the molar volume of the metal (m^3/mol).

The decision region is found using the calculated and experimental [1, 5, 14, 15] values of the coarsening transport coefficient for five fine metals (Ti, Ni, Fe, Nb, Cu). The decision region is limited straight lines. Straight lines connect the points obtained by calculating the coarsening transport coefficient for the

grain boundaries with crystal (c) and amorphous (a) properties. The decision regions are shown in Figure 1.

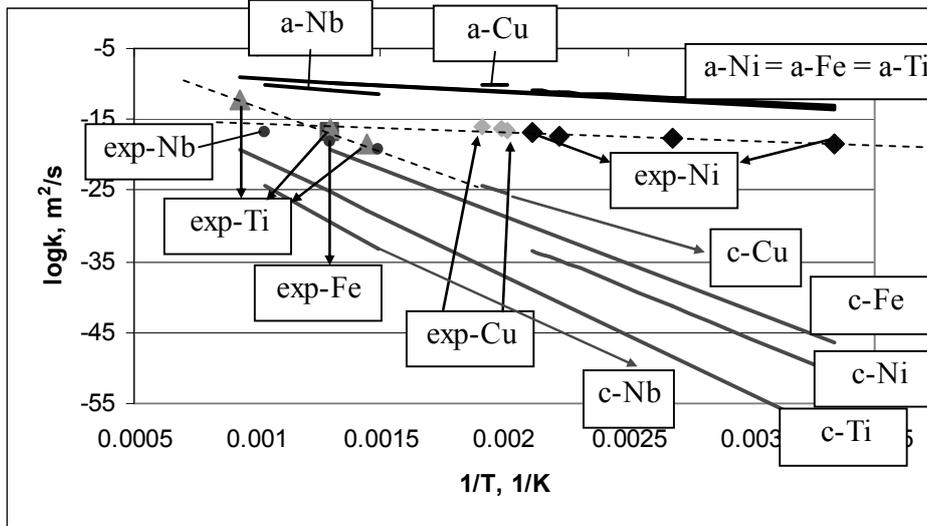


Figure 1 – Comparison of experimental and calculated intervals for k for Ti, Ni, Fe, Nb, Cu

The semi-empirical dependences for Ti, Ni, Fe, Nb and Cu have been received to simplify the calculation of the coarsening transport coefficient (Figure 2).

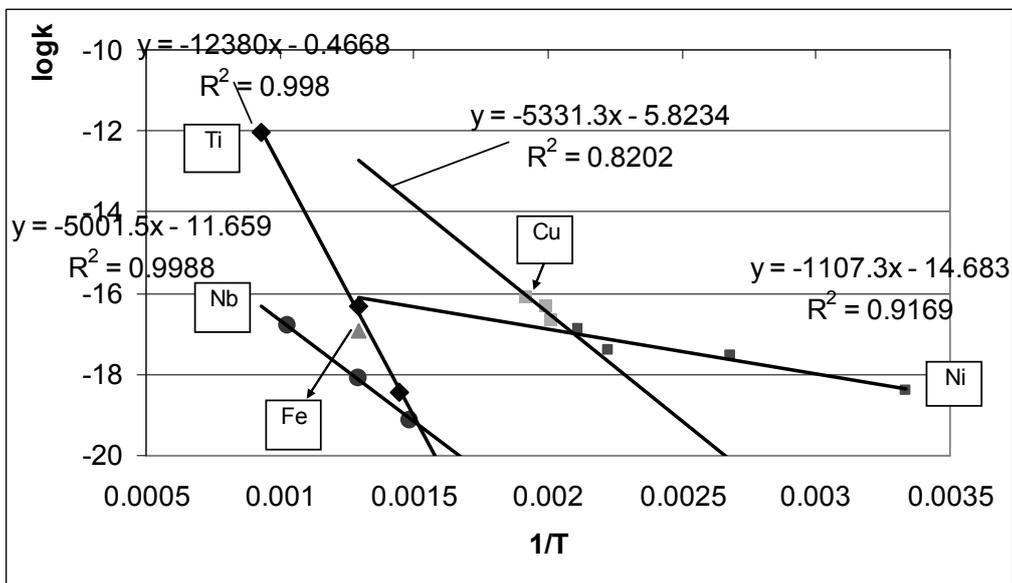


Figure 2 – Semi-empirical correlation between log k and 1/T for Ti, Ni, Fe, Nb, Cu

The following equations (4-7) can be used:

For Ni:
$$k = 10^{-\frac{14.683}{T} - 1107.3} \quad (4)$$

For Ti:
$$k = 10^{-\frac{0.4668}{T} - 12380} \quad (5)$$

For Cu:
$$k = 10^{-5.8234 - \frac{5331.3}{T}} \quad (6)$$

For Nb:
$$k = 10^{-11.659 - \frac{5001.5}{T}} \quad (7)$$

with T temperature (K).

4. The grain size of the workpiece after machining is determined using equation (8):

$$D = \sqrt{(D_0)^2 + 2 \cdot k \cdot t}, \quad (8)$$

with D0–the initial grain size (m), k–the coarsening transport (m²/s), t– time (s).

The value of the grain size after the growth process allows to predict the physical and mechanical characteristics of the workpiece surface layer (microhardness, breaking point, yield strength, etc.). The prediction is carried out to the experimental data [1-6, 14, 15].

Table – The rational machining condition of a number of fine metals at turning

Fine metal	Initial grain size, μm	Tool material	Cutting speed, m/min	Feed, mm/r	Cutting depth, mm	Lubricant-cooling agent
1	2	3	4	5	6	7
Copper	0,1	S6-5-2 (Euro), M2 or T1 (USA)	40-50	to 0,12	to 3	Aqueous solutions
	0,25		70-80	0,2-0,3	to 5	
	0,3		70-80	0,2-0,3	to 5	
Nickel	0,1	S6-5-2 (Euro), M2 (USA)	20-30	0,1-0,2	to 3	Aqueous solutions
	0,15		40-50	0,1-0,3	to 3	
	0,25		60	0,1-0,3	to 4	-
			40-50	0,1-0,3	to 4	
Niobium	0,1	S6-5-2 (Euro), M2 or T1 (USA)	60-70	0,05-0,1	to 3	Aqueous solutions
	0,2		80-95	0,2-0,3	to 5	
	0,3		80-95	0,2-0,3	to 5	-
Titan	0,1	K20	to 40	to 0,1	to 5	-
	0,25		40-50	0,1-0,15	to 5	
	0,3		to 60	0,1-0,15	to 5	
	0,1	synthetic diamond	to 80	to 0,1	to 5	
	0,25		100-120	0,1-0,15	to 5	
	0,3		100-120	0,1-0,15	to 5	

The model of workpiece surface integrity can be used for fine metals including copper, armco iron, and niobium.

The rational machining conditions for a number of fine metals have been found using the work of the algorithm. The rational machining conditions are presented in Table

The consistency includes the given model of grain growth intensity under the influence of time-temperature factors and the model of temperature distribution in the workpiece. The master data for modeling includes: the workpiece material, the initial grain size, the cutting tool material, the cutting conditions (speed, feed, cut depth, lubricant-cooling agent) and application conditions.

References: 1. *Valiev R.Z.*: Nanostructuring of Metals by Several Plastic Deformation for Advanced Properties. - *Nature Materials*, 2004. vol.3. p.511-516. 2. *Weertman J.R.*: Mechanical properties of nanocrystalline materials. - [Mater. Sci. Eng.](#), 1993. 166. p.161-171. 3. *Morris D.G.*: Mechanical Behavior of Nanostructured Materials. -*Trans. Tech. Publ., Uetikon-Zürich*, 1998. 4. *Valiev R.Z., Alexandrov I.V. and other*: Paradox of strength and ductility in metals processed by severe plastic deformation. - [J. Mater. Res.](#), 2002. 17. p.5-8. 5. *Salishchev G.A., Galeev R.M.*: Forming submicrocrystalline structure in the titanium and titanium alloys and their mechanical properties. - *Metallurgy and metals heat treatment*, 2006. №2. p.19-26. /in Russian/ 6. *Hornyak G., Dutta J. and other*: Introduction to Nanoscience. – CRC Press, N.Y., 2008. 815p. 7. *Lian J., Valiev R.Z. and other*: On the enhanced grain growth in ultrafine grained metals. - *Acta Met.*, 1995. vol.43. №11. p.4165-4170. 8. *Degtyaver M.V., Voronova A.V.*: On the thermal non-equilibrium microcrystalline structure in the single-phase metallic materials. - *DAN.*, 2002. vol.386. №2. p.180-183. /in Russian/ 9. *Humphrey F.J., Hatherly M.*: Recrystallization and related annealing phenomena. - Great Britain, Pergamon, 1996. p.497. 10. *Trent Ed.M., Wright P.K.*: Metal cutting, Butterworth. – Heinemann, USA, 2000. p.446. 11. *Verezub N.V., Kaptay G., Symonova A.A.*: The Methodology of Machining of the Bulk Nanocrystalline Materials. - *Modern technology in the engineering*, 2008. vol.2. p.19-26. /in Russian/ 12. *Reznikov A.N.*: Cutting thermal physics. – Moscow, Machine industry, 1969. p.102. /in Russian/ 13. *Kaptay G.*: A new theoretical equation for temperature dependent self-diffusion coefficient of pure liquid metals. – *Int J. Mater Res.*, 2008. vol.99, p.14-17. 14. *Gertsman V.Y., Birringer R. and other*: On the structure and strength of ultra-fine grained copper produced by several plastic deformation. - *Scripta Met. Mat.*, 1994. vol.30. p.229-234. 15. *Popova E.N.*: Influence of the deformation ratio on the structure and thermal stability nanocrystalline niobium produced by shear under. - *FMM.*, 2007. vol.103. №4 .p.426-432. /in Russian/.

А. Г. ДЕРЕВЯНЧЕНКО, д-р техн. наук,
О. Ю. БАБИЛУНГА, канд. техн. наук,
А. О. СОЦЕНКО, ДОЛИЩИНСКИЙ Р.Г., Одесса, Украина

РАСПОЗНАВАНИЕ ТЕКСТУР ЗОН ИЗНОСА РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ ФУРЬЕ ИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Викладено підхід до розпізнавання текстур зон зносу різальних інструментів на основі аналізу енергетичних спектрів Фур'є їх зображень. Програмно реалізована система розпізнавання текстур зображень зон зносу різальної частини на основі їх спектрального аналізу. Комп'ютерне моделювання роботи системи підтвердило можливість застосування підходу для розпізнавання класів різних текстур ріжучої частини. Отримані результати створюють перспективи для формування "карт класів текстур" різальної частини, що відображають прояв тих або інших механізмів зношування на різних ділянках контактних поверхонь інструментів.

Изложен подход к распознаванию текстур зон износа режущих инструментов на основе анализа энергетических спектров Фурье их изображений. Программно реализована система распознавания текстур изображений зон износа режущей части на основе их спектрального анализа. Компьютерное моделирование работы системы подтвердило возможность применения подхода для распознавания классов различных текстур режущей части. Полученные результаты создают перспективы для формирования "карт классов текстур" режущей части, отображающих проявление тех или иных механизмов изнашивания на различных участках контактных поверхностей инструментов.

An approach of texture recognition of cutting tools wear areas on the basis of power spectrums Fur'e analysis of their images is discussed. The system of wear areas texture recognition is programmatic realized on the basis of their spectrology. The computer design of the systems working confirmed possibility of application an approach for different cutting part textures classes recognition. The got results are created by prospects for the "maps of texture classes", forming for cutting part, representing the display of one or another mechanisms of wear on the different areas of contact surfaces of cutting tools.

В современном автоматизированном производстве одним из актуальных направлений является разработка систем контроля и диагностирования состояний режущих инструментов (РИ). Надежность их режущей части (РЧ), "наблюдаемость" состояний в процессе эксплуатации в значительной степени определяет работоспособность станка в целом [1].

Режущая часть РИ постепенно изнашивается, происходит изменение ее структуры и формирование зон износа. При обработке цифровых изображений этих зон, регистрируемых системами технического зрения, заметны проточкины, следы концентрированного износа и др., которые можно рассматривать как элементы текстуры. Своевременное выявление этих элементов в структуре РЧ обеспечивает возможность идентификации модели отказа РИ уже в начальный период работы и прогнозирования его индивидуального рабочего ресурса. При этом важными оказываются как оценка формы зоны износа, так и распознавание внутренних текстур. Выделение границ зон износа РЧ по цифровым изображениям выполняется с применением контурной сегментации. В работе [2] авторами показано, что использование методов контурной обработки на базе вейвлет-преобразования позволяет качественно подчеркнуть перепады интенсивности яркости изображений зон износа РЧ на разных уровнях детализации. Получаемые контуры зон износа (макродефектов) РЧ используются для формирования признаков состояния РИ.

Целью статьи является изложение подхода к распознаванию классов текстур зон износа РИ на базе спектрального подхода к описанию цифровых изображений их режущей части.

В структуре режущей части эксплуатируемого РИ могут быть выделены элементы, образовавшиеся вследствие действия тех или иных механизмов изнашивания (в условиях сложной геометрии изношенного РИ, неравномерности нагружения различных участков контактных поверхностей и др.). Представляется целесообразным многоуровневый подход к оценке этих элементов (дефектов). Выделяются элементы нескольких уровней: 1. макродефекты (собственно контактные поверхности РЧ); 2. дефекты (следы концентрированного износа, зоны нарушения целостности покрытия, проточкины и др., выделяемые в зоне макродефектов); 3. микродефекты – следы адгезионного и абразивного изнашивания и др., выделяемые в зонах макродефектов и дефектов. Присутствие элементов 2-го и 3-го уровней на контактных поверхностях РЧ приводит к формированию текстур различных уровней и классов. В данной работе рассмотрен подход к распознаванию текстур РЧ на уровне дефектов.

Предлагается выполнять “сканирование” цифрового изображения РЧ окном (рис. 1), в пределах которого производится распознавание класса текстур (класса дефектов). Далее может формироваться “карта классов текстур” РЧ, отображающая зоны проявления тех или иных механизмов изнашивания.

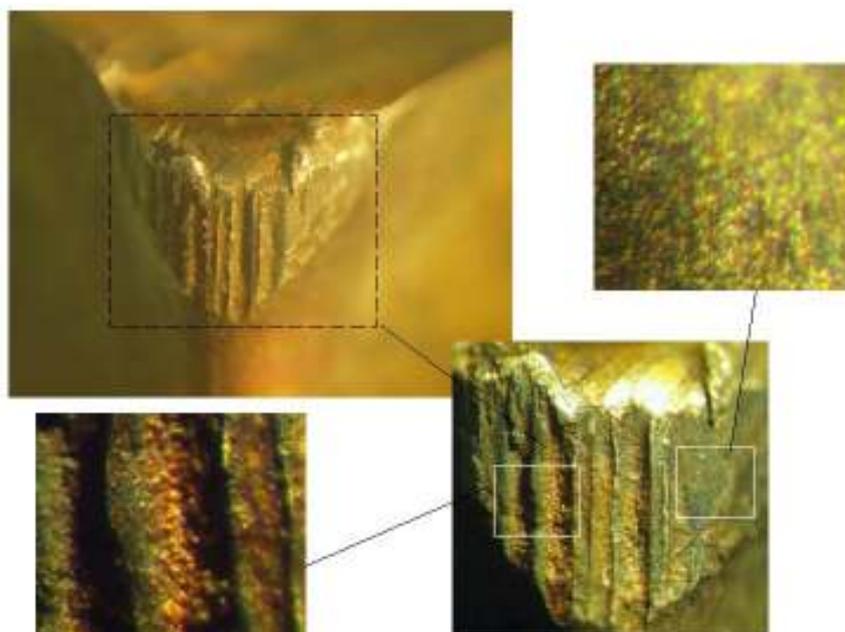


Рисунок 1 – Фрагменты цифрового изображения задней поверхности изношенного резца с различной текстурой (степенью дефектности)

Для реализации этого необходима система системы распознавания текстур РЧ, укрупненная схема которой представлена на рис. 2.

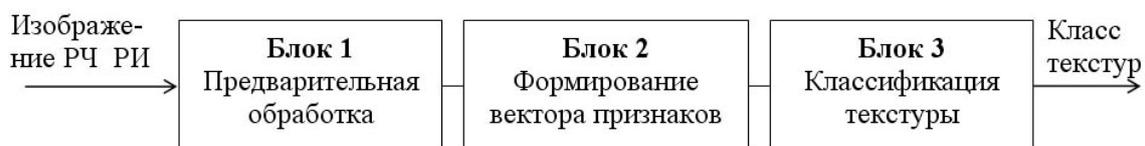


Рисунок 2– Структура системы распознавания текстур зон износа цифровых изображений РЧ.

Блок 1 реализует проведение операций по улучшению качества исходного изображения РЧ и включает в себя: программные модули фильтрации изображения с помощью заданных масок, медианной фильтрации, усредняющего фильтра, регулирования интенсивности, контрастности и других параметров изображения. Блок 2 выполняет обработку и анализ изображений РЧ с целью получения вектора признаков описания текстуры по энергетическому спектру Фурье. Блок 3 формирует решение о принадлежности текстуры зоны РЧ к одному из классов.

В базе данных программного комплекса содержатся эталонные описания классов текстур (например – в виде координат центров классов и радиусов условных “гиперсфер”, описанных вокруг множества векторов обучающей выборки для каждого класса – точек в пространстве состояний РЧ). При таком варианте описания после вычисления признаков текстур анализируемой зоны РЧ определяются Эвклидовы расстояния до центра

каждого класса, минимальное из которых указывает на класс текстуры. Кроме такого простейшего подхода к распознаванию могут строиться статистические, нейросетевые и другие классификаторы классов текстур РЧ.

В рамках спектрального подхода к описанию текстур изображений РЧ вычислялся спектр Фурье [3 - 6]. Выделяют следующие его свойства, полезные для описания текстуры: выступающие пики спектра указывают главное направление текстурной составляющей; местонахождение этих пиков на частотной плоскости дает основной пространственный период текстуры. После устранения всех периодических составляющих путем фильтрации в изображении РЧ остаются только непериодические компоненты. Анализ показал, что спектр Фурье подходит для описания присутствующих в изображениях РЧ периодических или квазипериодических двумерных структур.

Прямое двумерное дискретное Фурье преобразование изображения (функции $f(x, y)$) размерами $M \times N$ задается равенством [4]:

$$F(u, v) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) e^{-2j\pi\left(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N}\right)}, \quad (1)$$

где $u = 0, 1, 2, \dots, M-1$, $v = 0, 1, 2, \dots, N-1$. Переменные u и v называются переменными преобразования или частотными переменными, x и y – переменными изображения (текущими координатами его элементов).

Энергетический спектр изображения определяется формулой:

$$p(u, v) = |F(u, v)|^2 = R^2(u, v) + I^2(u, v), \quad (2)$$

где $R(u, v)$ – действительная часть величины $F(u, v)$; $I(u, v)$ – ее мнимая часть.

Для реализации спектрального подхода к распознаванию текстурных изображений зон износа РИ представилось целесообразным использовать следующий алгоритм [5]: 1. Вычисление энергетического спектра изображения; 2. Медианная фильтрация изображения; 3. Построение гистограммы энергетического спектра изображения и определение по ней порога бинаризации; 4. Бинаризация изображения спектра; 5. Контурная обработка бинаризованного спектра и прослеживание контура с формированием массива координат точек контура – контурного описания; 6. Формирование вектора признаков формы изображения по координатам точек контура с вычислением геометрических моментов признаков (ГМП); 7. Классификация текстур на основе вычисления Эвклидова расстояния

между вектором эталонных признаков и рассчитанных по входному изображению.

На рис. 3 приведены результаты реализации алгоритма при распознавании одного из классов текстур зон износа РЧ – концентрированного износа (а – фрагмент изображения зоны износа, б - 3D- представление энергетического спектра, в - 2D - представление энергетического спектра, г – сечение поверхности энергетического спектра горизонтальной плоскостью на определенном уровне (бинаризованный спектр), д – контур этого сечения).

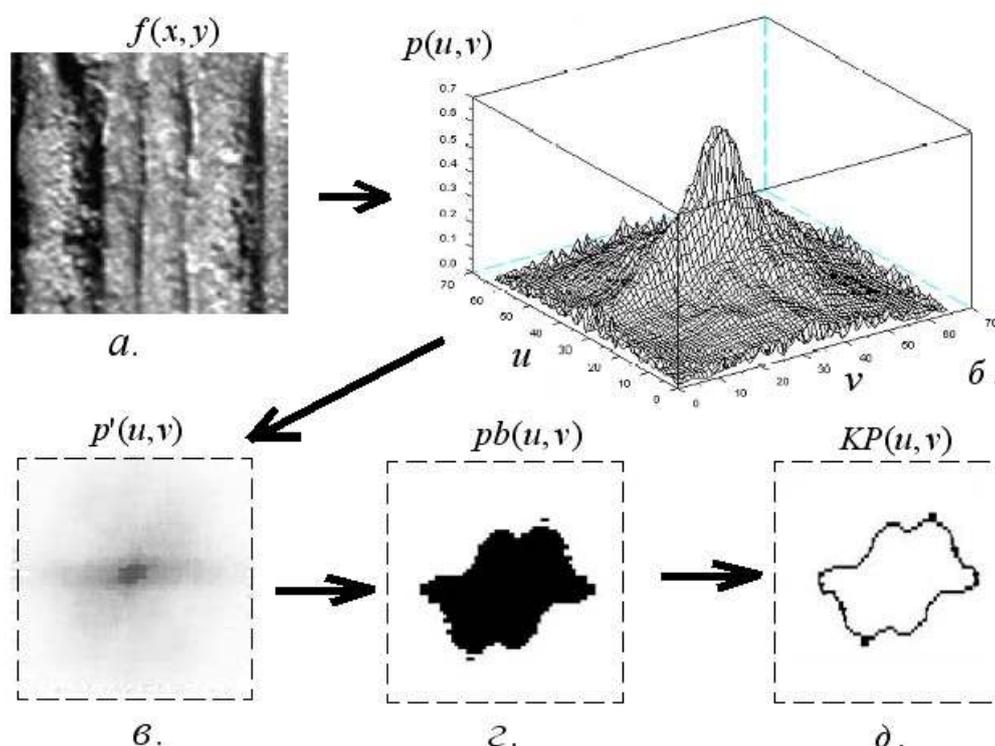
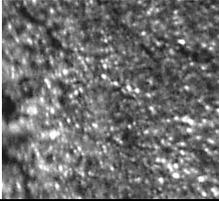
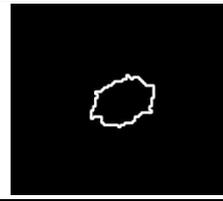
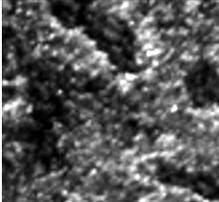
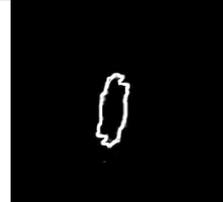
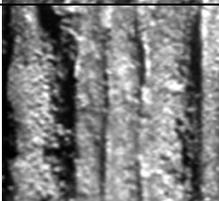
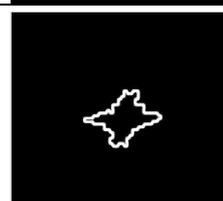


Рисунок 3 – Некоторые результаты реализации алгоритма распознавания текстур зон износа РЧ (на примере следов концентрированного износа).

В процессе тестирования системы распознавания текстурных изображений зон износа РИ были сформированы обучающие выборки изображений трех классов текстур. Примеры исходных изображений классов текстур РЧ, форм полученных в процессе бинаризации изображений энергетического спектров и их контуров приведены в табл. 1.

Для формирования векторов признаков, описывающих текстурные изображения, вычислялись ГМП, характеризующие форму объекта на контурном изображении ($KP(u, v)$) бинаризованного энергетического спектра [6]. Основные этапы формирования ГМП приведены в табл. 2.

Таблица 1 – Бинаризованные энергетические спектры текстурных зон РЧ и их контуры

Класс текстуры зоны износа контактной поверхности	Изображения зон изношенной поверхности РЧ	Бинаризованный энергетический спектр изображения	Контур изображения бинаризованного энергетического спектра
Равномерный износ (отсутствие элементов уровня дефектов)			
Следы нарушения целостности покрытия на режущей части			
Следы концентрированного износа			

Программная реализация системы распознавания текстурных изображений зон износа режущих инструментов выполнена в среде разработки Microsoft Visual Studio C#. Для обмена информацией между модулями программы предусмотрена запись векторов признаков в XML-файлах текстового формата, предназначенный для хранения структурированных данных. Разработан удобный интерфейс системы распознавания текстур изображений РЧ, позволяющий пользоваться всеми функциями системы и отображать текущие результаты работы (рис. 4).

Предварительные исследования, проведенные на небольших обучающих выборках классов текстур РЧ, позволили получить следующие значения вероятности правильного распознавания (ВПР): зоны равномерного износа – 0,86; зоны нарушения целостности покрытия на РЧ – 0,84; зоны концентрированного износа – 0,90. Увеличение ВПР может быть достигнуто на основе применения статистических и нейросетевых классификаторов.

Таблица 2 – Этапы формирования геометрических моментов признаков контуров бинаризованных энергетических спектров зон текстур РЧ

№	Содержание этапа	Формула	Пояснения
1	Вычисление площади контура через координаты его точек	$S = \sum_{i=1}^n [(y_i + y_{i+1})(x_i - x_{i+1})] / 2$	n – число точек контура
2	Нахождение статистических моментов инерции контура в заданной системе координат по приближенным	$I_x = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^n (x_i - x_{i+1})(y_i^2 + y_i y_{i+1} + y_{i+1}^2);$ $I_y = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^n (y_i - y_{i+1})(x_i^2 + x_i x_{i+1} + x_{i+1}^2).$	
3	Вычисление R_i по всем точкам контура, вычисление R_{\min} и R_{\max} .	$R_i = \sqrt{(x'_i)^2 + (y'_i)^2}$	Координаты i -ой точки в новой системе: $x'_i = x_i - x'_0,$ $y'_i = y_i - y'_0.$
4	Определение шага дискретизации	$\Delta\rho = (R_{\max} - R_{\min}) / J$	J – количество уровней
5	Вычисление по прослеженному контуру значений β_j	$\beta_j = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (\rho_j^2 - \rho_{j-1}^2) \Delta\varphi_i + (R_i R_{i+1} \sin \Delta\varphi_i - \rho_{j-1}^2 \Delta\varphi_i)$	$\Delta\varphi_i$ – угол между векторами R_i и R_{i+1}
6.	Определение значений ГМП	$c_{jp} = \beta_j \left(\frac{\rho_j}{R_{\min}} \right)^p$	

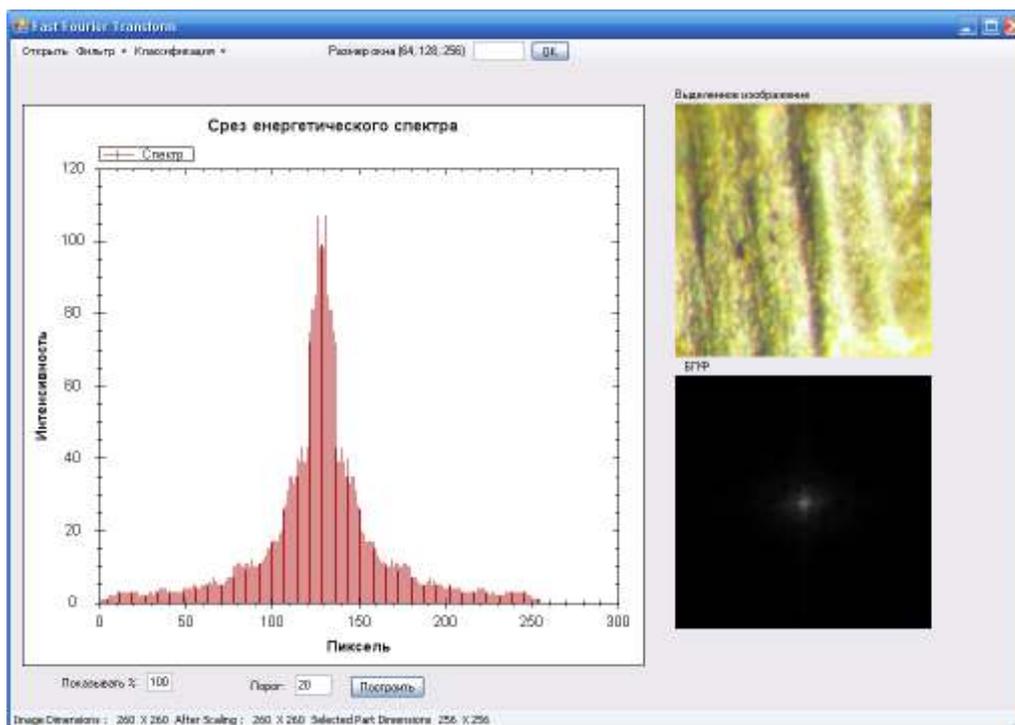


Рисунок 4 – Одно из окон системы обработки текстур изображений РЧ

В заключение отметим следующее. Предложен подход и программно реализована система распознавания текстур изображений зон износа РЧ на основе их спектрального анализа. Компьютерное моделирование работы системы подтвердило возможность применения подхода для распознавания классов различных текстур режущей части. Полученные результаты создают перспективы для формирования ”карт классов текстур” РЧ, отображающих проявление тех или иных механизмов изнашивания на различных участках контактных поверхностей инструментов.

Список литературы: 1. Дерев'янченко А.Г., Павленко В.Д., Андреев А.В. Диагностирование состояний режущих инструментов при прецизионной обработке. – Одесса, Астропринт, 1999. – 184 с. 2. Антощук С.Г., Бабилунга О.Ю., Дерев'янченко О.Г. Контурна сегментація зображень при контролі різальних інструментів // Вісник ЖДТУ. – Житомир, 2006. – № 4(39). – С. 3-8. 3. Haralick R.M. Statistical and Structural Approaches to Texture / R.M. Haralick // Proceeding of the IEEE. – 1979. – Vol. 67. – P. 786-804. 4. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с. 5. Антощук С.Г., Сербина Н.А. Система распознавания текстурных изображений при экологическом мониторинге // Искусственный интеллект. – 2002. – № 1. – С. 406-413. 6. Анисимов Б.В., Курганов В.Д., Злобин В.К. Распознавание и цифровая обработка изображений: Учебное пособие для вузов. – М.: Высшая школа, 1983. – 295 с.

B. ILLÉS, Prof. Dr.-Ing. habil, Miskolci, Ungarn

E. GLISTAU, Dr.-Ing Magdeburg, Deutschland

N. I. COELLO MACHADO, Prof.Dr.-Ing. Santa Clara, Kuba

SICHERUNG DER LOGISTIKQUALITÄT

Дана робота висвітлює дослідницькі й освітні завдання трьох університетів, що співробітничують між собою. При цьому мова йде про дослідження використання наявностей, що є в наявності (див [1]) керування якістю й логістики в інших сферах застосування. Дослідницькі роботи ведуться з 2003 року систематично й на основі поділу праці. Шляхом синергетического об'єднання й систематизації варто розширити, тобто модифікувати відомі області застосування, а також відкрити зовсім нові області застосування. Одночасно варто внести значний вклад у забезпечення якості в логістиці. Для того щоб використати накопичені знання безпосередньо в процесі навчання або підвищення кваліфікації, був підготовлений рукопис для загального навчального посібника "Забезпечення якості в логістиці" на угорській і німецькій мовах. Із цією метою були встановлені випробувані методи в електронному банку даних, які були підготовлені для безпосереднього використання.

Данная работа освещает исследовательские и образовательные задачи трех сотрудничающих между собой университетов. При этом речь идет об исследовании использования имеющихся в наличии методов (см [1]) управления качеством и логистики в других сферах применения. Исследовательские работы ведутся с 2003 года систематически и на основе разделения труда. Путем синергетического объединения и систематизации следует расширить, то есть модифицировать известные области применения, а также открыть совершенно новые области применения. Одновременно следует внести значительный вклад в обеспечение качества в логистике. Для того чтобы использовать накопленные знания непосредственно в процессе обучения или повышения квалификации, была подготовлена рукопись для общего учебного пособия «Обеспечение качества в логистике» на венгерском и немецком языках. С этой целью были установлены испытанные методы в электронном банке данных, которые были подготовлены для непосредственного использования.

Der nachfolgende Beitrag beleuchtet einen Forschungs- und Ausbildungsschwerpunkt der drei kooperierenden Universitäten. Dabei geht es um die Erforschung der Nutzung des Methodenvorrats (Vgl. [1]) von Qualitätsmanagement und Logistik im jeweils anderen Applikationsbereich. Die Forschungsarbeiten werden seit 2003 systematisch und arbeitsteilig durchgeführt. Durch synergetische Verknüpfung und zu leistende Systematisierungen sollen die bekannten Einsatzgebiete erweitert bzw. modifiziert sowie gänzlich neue Einsatzgebiete erschlossen werden. Gleichzeitig soll ein wesentlicher Beitrag zur Sicherung der Qualität in der Logistik geleistet werden.

Um das gesammelte Wissen unmittelbar in der Aus- und Weiterbildung zu nutzen, wurde das Manuskript für ein gemeinsames Lehrbuch „Qualitätssicherung in der Logistik“ in den Sprachen ungarisch und deutsch fertig gestellt. Darüber hinaus werden erprobte Methoden in die gemeinsame webbasierte Methodendatenbank mlog eingestellt und für eine multivariate Nutzung zur Verfügung gestellt.

1. LOGISTIKQUALITÄT

Logistik-Qualität lässt sich in Anlehnung an die EN ISO 9000:2000 definieren als „Eignung eines Logistikprozesses, die vom Kunden geforderte Logistikleistung zu erbringen.“ Qualität ist demnach auch im Logistikkontext der Erfüllungsgrad von Anforderungen. Wesentliche Kenngrößen zur Messung der Logistikqualität sind hierbei u.a. die Lieferfähigkeit, die Lieferzeit und die Liefertreue.

Zur Einhaltung der Logistikqualität ist die Störungsbeherrschung notwendig. Dies bedingt eine ganzheitliche, systematische Behandlung von Fehlern und potenziellen Fehlermöglichkeiten jeglicher Art in Logistikprozessen und Logistiksystemen.

Eine logistische Leistung gilt vereinfacht immer dann als erfüllt, wenn der Kunde in der richtigen Qualität und zu richtigen Kosten die richtigen Erzeugnisse in der richtigen Menge am richtigen Ort zum richtigen Zeitpunkt erhält (= Versorgen) bzw. abgeben kann (= Entsorgen). Die Gestaltungsmöglichkeiten des Logistikers liegen in der Auswahl, Dimensionierung und Gestaltung von Systemen und in deren ziel orientierten Nutzung durch physische und informationelle Logistikprozesse. Es liegt daher nahe, sich auch in der Logistik auf anerkannte Methoden des Qualitätsmanagements zu stützen und diese bedarfsgerecht zu nutzen sowie auf die Anwendung bezogen spezifisch zu erweitern.

Fehler in der Logistik liegt vor, wenn die Anforderungen des Kunden nicht erfüllt sind, wenn folglich die Merkmale nicht den Erwartungen oder Anforderungen entsprechen. Die möglichen Merkmale, die ein Logistikfehler aufweisen kann, einschließlich der dazugehörigen Ausprägungen zeigt Tabelle 1. Unter Ausprägung versteht man dabei den qualitativen Wert (zu früh) oder quantitativen Wert (- 4 Stunden), den ein Merkmal besitzt. Da bei den Objekten unterschiedliche Betrachtungsebenen möglich sind, wird an dieser Stelle eine Unterscheidung vorgenommen in:

- Einzelobjekt (EO),
- Verpackungseinheit (VE),
- Ladeinheit (LE)

Tabelle 1 – Fehler in der Logistik (vgl. dazu [17])

Fehlerart	Fehlermerkmal	Ausprägung	Objekt		
			EO	VE	LE
... Lagerungsfehler	Zeit	zu früh	X	X	X
		zu spät	X	X	X
... Transportfehler	Ort	am falschen Ort	X	X	X
	Menge	zu viel	X	X	0
zu wenig		X	X	X	
zu viel in einer Verpackung		0	X	0	
... Umschlagfehler	Konstitution	zu wenig in einer Verpackung	0	X	0
		unvollständiges Objekt	0	X	X
... Sammelfehler	Konstitution	falsch zusammengesetzt (inhomogen/ homogen)	0	X	X
		falsche Reihenfolge der Sorten	0	X	X
... Verteilfehler	Konstitution	falsche Mengenverhältnisse der verschiedenen Sorten	0	X	X
... Sortierfehler		Erscheinung	falsche Verpackung	0	X
... Sortimentierfehler	s- form	falsch verpackt	0	X	0
		Information	falsche Information	X	X
unvollständige Information	X		X	X	
Information nicht identifizierbar	X		X	X	
fehlende Information	X		X	X	
... Verpackungsfehler	Wert	zu teuer	X	X	X
... Beschriftungsfehler		Sorte	falsches Objekt	X	X
	Identifizierungsfehler		Objektqualität beeinträchtigt	X	X

Bestimmte Fehler (falsch verpackt) können nur vorkommen, wenn es sich um Verpackungseinheiten handelt.

Unter einem **Einzelobjekt (EO)** wird hier ein einzeln betrachteter Artikel oder ähnliches verstanden wie z.B. ein PKW.

Eine **Verpackungseinheit (VE)** ist ein homogen oder inhomogen zusammengesetztes Gut, das durch eine Umverpackung zu einem Objekt zusammengefasst ist. Beispiel für eine VE ist der Bausatz für ein Möbelstück, der sich in einem Karton befindet.

Eine **Ladeinheit (LE)** hingegen ist aus mehreren EO oder VE zusammengesetzt. (Bei einem Umzug bildet z.B. die gesamte Wohnungseinrichtung einer Wohnung auf einem LKW eine Ladeinheit. Ladeinheiten bestehen z.B. aus Verpackungseinheiten (Bücherkartons mit einzelnen Büchern) und Einzelobjekten (Waschmaschine, Kühlschrank).

2. DER METHODENVORRAT DES QUALITÄTS-MANAGEMENTS FÜR DIE SICHERUNG DER LOGISTIKQUALITÄT

Der Methodenvorrat des Qualitätsmanagements wurde in der Fachliteratur umfassend be- schrieben. Stellvertretend für den Methodenvorrat sollen folgende Methodengruppen des Qualitätsmanagements genannt werden:

- die Analyseverfahren,
- die Managementverfahren und
- die Präventiven Verfahren (vgl. Tabelle 2).

Tabelle 2 – Übersicht über den klassischen Methodenvorrat des Qualitätsmanagement

Analytische Methoden	
Strichliste	Fehler systematisch erfassen
Histogramm	Fehlerhäufigkeiten visualisieren
Pareto und Lorenz-Pareto-Analysen	Fehler priorisieren
Ursache-Wirkungs-Diagramme	Fehlerursachen systematisch analysieren
Streuungsdiagramme	Vermutung von Abhängigkeiten
Fähigkeitsanalysen	Fehler durch Beobachtung rechtzeitig erkennen
Präventive Verfahren	
QFD bzw. LFD	Aufnahme und gezielte Umsetzung von Kundenanforderungen (Marktrealität) in Produkte und Dienstleistungen
FMEA	Fehler vermeiden
Fehlerbaumanalyse	Logische Verknüpfung von Fehlern ermitteln und Maßnahmen ableiten
Statische Prozesskontrolle (SPC)	Überwachung des Verhaltens von Indikatoren
Poka Yoke	Null-Fehler-Programm
Statistische Versuchsplanung	Entscheidende Einflussgrößen durch Versuche ermitteln und quantifizieren
Managementverfahren	
Affinitätsdiagramme	Zur Sammlung von Ideen und nachfolgendem Ordnen in einer Struktur
Relationsdiagramme	Vernetzung und Abhängigkeiten von Strukturen sichtbar machen
Baumdiagramme	Wechselbeziehungen zwischen einem Ziel und Maßnahmen sichtbar machen
Matrixdiagramme	Verdeckte Strukturen und Zusammenhänge erkennbar machen
Prozentscheidungsdiagramme	Potenzielle Probleme früh erkennen
Pfeildiagramme	Projektplanung (Tätigkeiten, Zeitdauern und Abhängigkeiten definieren

Zur Sicherung der Logistikqualität leisten die analytischen Methoden den Beitrag, dass sie bei richtiger Anwendung Fehler in logistischen Prozessen und Systemen aufspüren und Ursachen aufdecken.

Durch Anwendung der präventiven Methoden wird eine konsistente Zielausrichtung an den Kundenanforderungen erreicht und Fehler durch gezielte Prävention vermieden. Dabei geht es im Kern nicht um Investitionen sondern um einfache, intelligente und sichere organisatorische und technische Lösungen.

Die Managementmethoden kommen immer dort zum Einsatz, wo weder Daten noch Erfahrungswissen vorhanden sind. Hier müssen gänzlich neue Lösungen entwickelt und über ein Projektmanagement erfolgreich realisiert werden.

Die aufgezählten Methoden sind dabei nur Stellvertreter eines Methodenpools, der zur Erfüllung der genannten Aufgabe gleichfalls zur Verfügung steht. (Vgl. dazu [2] bis [6])

Darüber hinaus existieren neben diesen drei Methodengruppen eine ganze Reihe weiterer Methoden, die insbesondere in der letzten Zeit diskutiert werden. Exemplarisch seien die Sensitivitätsanalyse (vgl. Bild 1), Six-Sigma und die Prozessfähigkeit genannt.

Die Sensitivitätsanalyse nach VESTER ist eine durch Software unterstützte Methode des vernetzten Denkens. Sie ermöglicht es, innerhalb eines betrachteten Systems kritische Faktoren, aktive Faktoren (Stellgrößen) und Indikatoren klar voneinander zu unterscheiden. Die Stellgrößen werden nachfolgend zur gezielten Beeinflussung von logistischen Systemen genutzt. Der Erfolg des Regelungsprozesses wird an den Indikatoren gemessen.

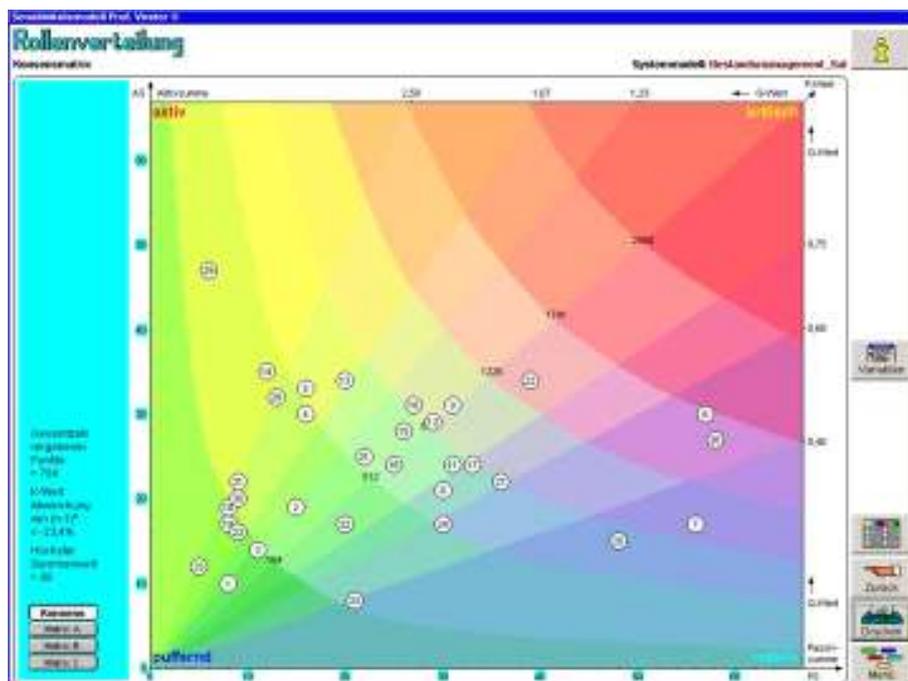


Bild 1 – Sensitivitätsanalyse (Screen Shot)

Bei Six Sigma und dem Nachweis der Prozessfähigkeit geht es im Kern um das Erreichen von fähigen und beherrschten Prozessen durch Quantifizierung und gezielte Beeinflussung. Die Prozessfähigkeit wird durch 2 Kenngrößen beschrieben: Die eine Kenngröße charakterisiert die Streuung der Merkmale, die zweite die Prozesslage. Ist die Streuung im Vergleich zu den Grenzwertvorgaben hoch, wird die Vorgabe vermutlich relativ oft überschritten. Die Maßnahmen müssen dementsprechend darauf ausgerichtet werden, die Streuung zu verkleinern. Ein Verschieben der Prozesslage hingegen bedeutet, dass der aktuelle Merkmalswert eine Verschiebung gegenüber dem Mittelwert der Merkmale (Mitte des Toleranzbereichs) aus der Vorperiode aufweist. Auslöser dieser Verschiebung können systematische Fehler, Trends (Wartungsintervalle, Alterung von Komponenten), Schichtwechsel etc. sein.

Six Sigma (6σ) zielt auf das Erreichen eines möglichst fehlerfreien Prozesses. Es basiert auf einer Analyse des Ist-Prozesses, um die für den Prozess wichtigen Parameter, Fehlermöglichkeiten und Prozesskennzahlen zunächst zu erkennen. Danach sollen sie auf Basis einer objektiven, statistischen Analyse gezielt beeinflusst werden. (Vgl. zur Methode [8] bis [10]) Abweichungen oder Streuungen sollen eingeschränkt werden und Fehler oder Qualitätsprobleme jeglicher Art eliminiert werden. Transparenz und Nachvollziehbarkeit sind bei der Analyse, der Entscheidungsfindung und beim Nachweis des Projekterfolges in der Six Sigma-Methode besonders wichtig. Dazu werden etablierte Techniken der Qualitätssicherung mit Methoden der Datenanalyse und einer systematischen Qualifizierung zumeist in Form eines Trainings der Mitarbeiter kombiniert.

3. ERGEBNISSE UND REFERENZIERUNG

Die genannten Methoden des Qualitätsmanagements werden seit drei Jahren in Studien- und Diplomarbeiten vor Ort in Unternehmen unterschiedlicher Branchen (u. a. Automobilbau, Elektronik, Pharmazeutische Industrie, Logistik-Dienstleister) an unterschiedlichen, logistischen Aufgabenstellungen angewendet und damit getestet. Dadurch werden zunächst Beispiellösungen im Logistikkontext geschaffen, durch die die Nutzbarkeit innerhalb der Logistik praktisch belegt wird. Diese Beispiele sollen nachfolgend zu Referenzlösungen generalisiert werden.

Insgesamt zeigt sich, dass alle Methoden für die Logistik sehr gut nutzbar sind, obwohl sie derzeit im Logistikkontext noch nicht sehr verbreitet sind. Deshalb besteht eine wesentliche Aufgabe darin, mehr Beispiellösungen sowie verallgemeinerte Musterlösungen zu schaffen und diese zu publizieren.

Tabelle 3 – Sichten auf die Logistik (Vgl. dazu [11])

Kategorien	Physische Sicht	Informationelle Sicht
Operand als Bestandteile des Logistikprodukts	Güter z.B.: Ware Teil Abfall Tier Personen	Informationen z.B.: Auftrag Zustandsinformation Abrechnung Identifikationsnummer
Operationen als Grundelemente von Prozessen	Materialfluss Lagern Transportieren, Umschlagen Sammeln / Verteilen Sortieren / Sortimentieren Verpacken Beschriften / Identifizieren	Informations- und Kommunikationsfluss Erfassen Verarbeiten Speichern / Verwalten Ausgeben / Nutzen
Operatoren als Bestandteile von Logistiksystemen	Materialfluss- systeme Mensch, Betriebsmittel z.B.: Verkehrstechnik Lagertechnik Fördertechnik Verpackungstechnik	Informations- und Kommu- nikationssysteme Mensch, Betriebsmittel z.B.: Identifikationstechnik Steuerungstechnik Leitstandstechnik Kommunikations- technik

Zum Schaffen von Referenzmodellen bietet das Denkmodell Hilfestellung, Logistik in Logistikprodukt, Logistikprozess und Logistiksystem aufzuteilen. Dies ermöglicht es, Beschreibungsstandards zu schaffen und diese nachfolgend für unterschiedlichste Anwendungen zu nutzen. (Vgl. dazu Tabelle 3) Die Unterteilung in Produkt – System – Prozess macht es erforderlich, auch die Relationen zwischen diesen Aspekten zu betrachten. (vgl. dazu Tabelle 4)

Tabelle 4 – Relationen zwischen Logistikprodukt, Logistiksystem und Logistikprozess

Beschreibungs- aspekt	Logistikprodukt	Logistiksystem	Logistikprozess
Logistikprodukt	•	(R 1)	(R 2)
Logistiksystem	R 1	•	(R 3)
Logistikprozess	R 2	R 3	•

4. LOGISTIK DER QUALITÄTSSICHERUNG

Die Logistik selbst leistet auch wichtige Aufgaben zur Qualitätssicherung. Die Betrachtung von qualitätsrelevanten Prozessen unter dem Blickwinkel der Logistik bedeutet, dass der Material- und Informationsfluss auch innerhalb des Qualitätsmanagementsystems gewährleistet werden muss, das sich über den gesamten Lebenszyklus eines Produktes oder einer Dienstleistung erstreckt.

Wichtige Logistik-Aufgaben sind dabei:

- Die Gewährleistung des Materialflusses an den Orten der Qualitätskontrolle.
- Die Gewährleistung des mit dem Materialfluss zusammenhängenden Informationsflusses und seiner Verarbeitung.
- Die Lenkung des Materialflusses nach Qualitätsklassen (z.B. Gutteil, Ausschuss, Nacharbeit, Klärung) aufgrund der zur Verfügung stehenden Informationen.
- Die Verfolgung der Produkte aufgrund ihrer Qualitätsmerkmale.

Bild 2 gibt einen Überblick über qualitätssichernde Mittel, wie z.B. die Auswahl einer geeigneten Verpackung. Zielsetzungen bei der Planung von Materialflusssystemen sind z.B. kurze Durchlaufzeiten, hohe Ressourcenauslastung, robuste, schnelle und einfache Prozesse, hohe Lieferbereitschaft und Liefertreue, humane Arbeitsgestaltung, geringe Kosten und minimale Fehlerrate.

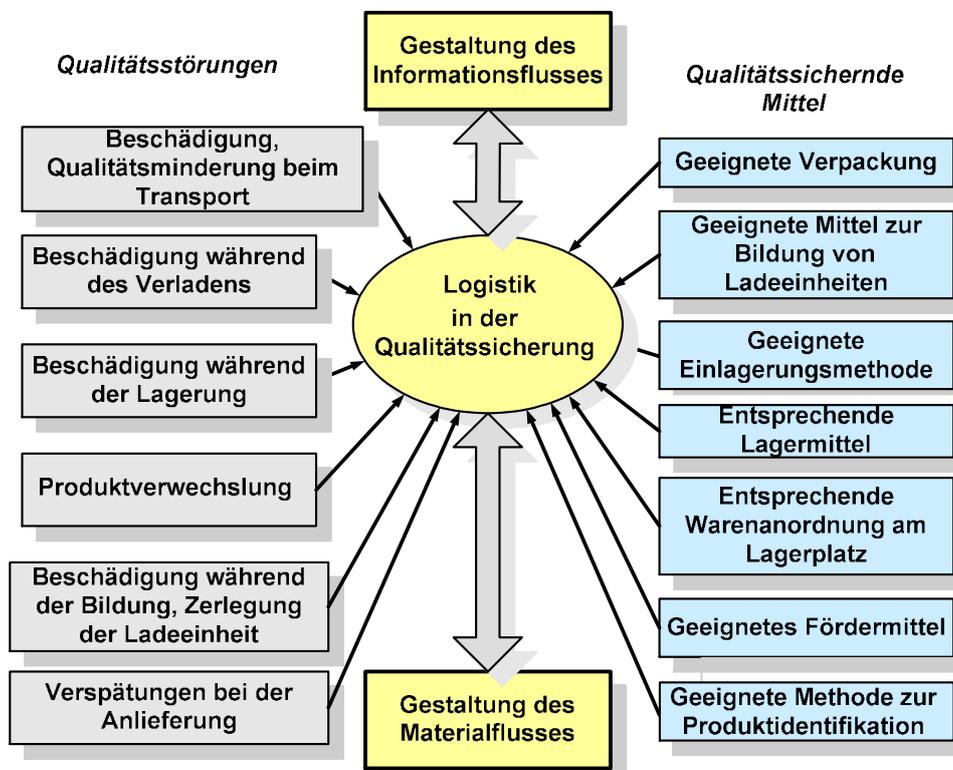


Bild 2 – Beispiele für qualitätssichernde Mittel (Vgl. [7])

Tabelle 5 – Wichtige Logistikaufgaben der Qualitätssicherung (Vgl. dazu [7])

QS-Bereich	Logistikaufgaben (Kleiner Auszug)
Marketing und Marktforschung	- Es ist zu überprüfen, ob bei den betreffenden Produkten die geforderte Qualität mit den zur Verfügung stehenden Methoden und Mitteln des Verpackens, des Transports, des Handlings und der Lagerung gewährleistet werden kann.
Produktplanung	- Die logistische Eignung der Produkte muss bewertet und Logistikkosten kalkulatorisch berücksichtigt werden.
Materialbeschaffung	- Die Lieferantenauswahl muss nach Kriterien wie der Qualität des gelieferten Produktes, der Liefertreue und einer verlässlichen Produktidentifikation erfolgen.
Prozessplanung	- Dies umfasst die Planung der Materialflussprozesse für Gutteile, Nacharbeit, Ausschuss und Rückläufer / Reklamationen.
Fertigung	- Material- und Informationsflüsse sind in das Qualitätssicherungssystem zu integrieren. - Die Identifikation und Verfolgung der Produkte im logistischen Prozess sind aufwandsarm zu realisieren. - Die Erhaltung der Produktqualität muss im logistischen Prozess gewährleistet werden.
Kontrolle und Prüfung	- Bei der Gestaltung des Materialflusses sind Kontroll- und Prüfmöglichkeiten zu berücksichtigen.
Verpackung und Lagerung	- Dies umfasst die Auswahl und Gestaltung der Verpackung zum Schutz der Produktqualität sowie die - Einhaltung von Qualität bestimmenden Ein- und Auslagerungsstrategien (FIFO).
Vertrieb	- Es müssen Produkte von der bestellten Qualität geliefert werden. - Die Kundenanforderungen an die Lieferung müssen erfasst und zuverlässig eingehalten werden.
Montage und Betrieb	- Die Erhaltung der Produktqualität muss während der Montage gewährleistet werden. - Für den Betrieb notwendige Einzelteile, Baugruppen und Hilfs-, Betriebsstoffe müssen zum entsprechenden Zeitpunkt aufwandsarm zur Verfügung gestellt werden.
Service und Instandhaltung	- Materialien und Bauteile entsprechender Qualität müssen fortlaufend bereitgehalten werden - von Ersatzteilen muss ein entsprechender Lagerbestand gehalten beziehungsweise eine kurzfristige Lieferung gesichert werden
Ausmusterung, Entsorgung	- Es müssen geeignete Logistikketten zur Sortierung, zum Transport, zur Lagerung und zur Aufbereitung realisiert werden
Materialverfolgung	- Es müssen Informationen über Beschaffung, Fertigung und Vertrieb bereitgestellt werden wie z.B. Durchlaufzeiten, Nacharbeits- und Ausschussanteil, Bestandshöhen, Kosten der in das Fertigprodukt eingebauten Materialien, Abfallhöhe, Verrechnungsroutinen von anfallenden Kosten (Prozesskosten)

5. LEHRBUCHKONZEPT „ QUALITÄTSSICHERUNG IN DER LOGISTIK“

Bild 3 stellt den Gesamtaufbau des gemeinsamen Lehrbuches dar. Die Hauptthemen des

Lehrbuches, die gleichzeitig Kapitel darstellen, werden durch Ziffern gekennzeichnet. Zunächst werden wichtige Begriffe und Zusammenhänge erläutert. Dazu gehören die beiden Kernbegriffe Logistik (Logistikprodukt, Logistiksystem und Logistikprozess) sowie Qualität (Qualitätsmanagement und Qualitätssicherung).

Im Kapitel 2 werden die Methoden erläutert, mit denen Kundenanforderungen aufgenommen und dann in Anforderungen an logistische Produkte, Prozesse und Systeme transformiert werden. Diese Kundenanforderungen stellen das Soll dar, an denen sich die Leistungsfähigkeiten der logistischen Produkte, Prozesse und Systeme messen lassen muss. Dieses Soll ist direkt aus den vorhandenen oder den zu erwartenden Kundenwünschen und – Erwartungen systematisch abzuleiten.

Zusätzlich muss diese Logistikleistung jedoch auch effektiv und effizient erbracht werden, um die Existenz des Unternehmens zu sichern. Im Kapitel 3 wird gezeigt, wie Best Practices als Vorbild und Soll (Maßstab) genutzt werden können. Dies betrifft z.B. Übernahme erfolgreicher Prozessgestaltungslösungen oder die Nachnutzung technischer Innovationen.

Im Kapitel 4 wird erläutert, wie präventive Methoden zur Fehlervermeidung und –Reduzierung genutzt werden. Damit soll die Anzahl von Fehlern bzgl. logistischer Produkte, Systeme und Prozesse bereits im Vorfeld deutlich reduziert und gleichzeitig die Sicherheit und Zuverlässigkeit deutlich erhöht werden.

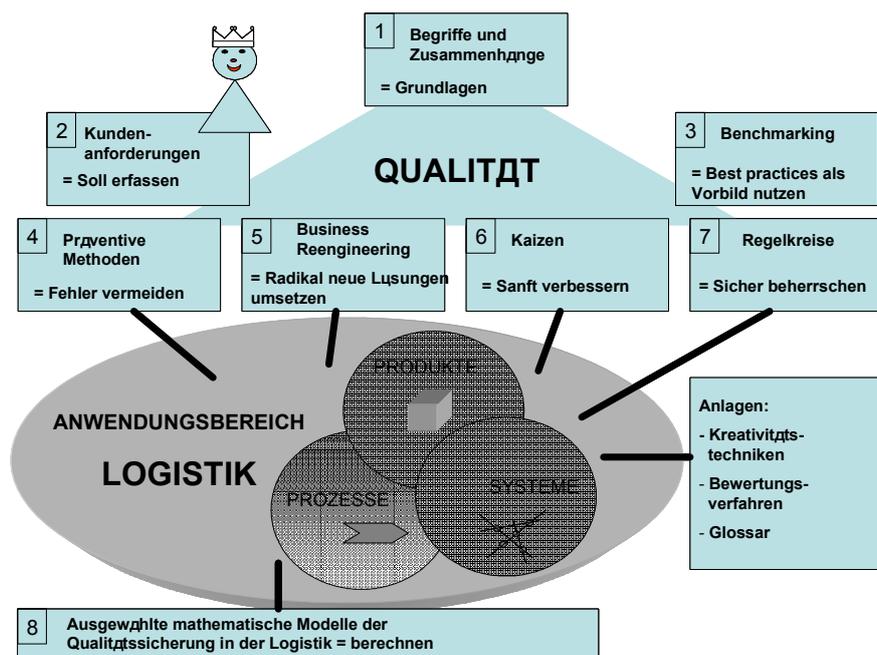


Bild 3 – Grundaufbau des gemeinsamen Lehrbuch-Projektes

Kapitel 5 und 6 widmen sich den beiden grundsätzlichen Vorgehensweisen zur Verbesserung. Zum einen werden die radikale Neugestaltung (Business Reengineering) und zum anderen die Methode der sanften Verbesserung (Kaizen) erläutert. Beide Methoden sind dabei nicht alternativ sondern in Kombination zu nutzen, um den größten Effekt zu erzielen. Sie wurden traditionell vorwiegend für Prozesse entwickelt und genutzt, sind aber gleichermaßen für Systeme sinnvoll nutzbar.

Trotz systematischer Fehlervermeidung und permanenter Verbesserung verbleiben jedoch Fehler in logistischen Prozessen und Systemen, die z.B. auf das Wirken von Menschen, dem Versagen von Technik oder der Änderung von Umweltbedingungen zurück zu führen sind. Im Kapitel 7 wird gezeigt, wie Regelkreise zur Störungsbeherrschung geschaffen und genutzt werden. Diese sollen die Störungswirkungen minimieren, für Transparenz sorgen und durch Rückinformation an den Verursacher für nachhaltiges Abstellen der Störungsursachen sorgen. Dazu ist es zunächst notwendig die geeigneten Regelgrößen zu identifizieren.

Im Kapitel 8 werden einige mathematische Betrachtungen zur Qualitätssicherung der Logistik vorgenommen. Diese sollen belegen, wie die Wissenschaft durch Grundlösungen von logistischen Problemen zum erfolgreichen Bewältigen logistischer Aufgaben beiträgt.

Gesamtziel dieses Buches ist es, den Methodenvorrat des Qualitätsmanagement für den Logistiker zu öffnen. Beispiele aus der Welt der Logistik und Hinweise zur Anwendung sollen die praktische Nachnutzung erleichtern.

Das Lehrbuch wird sowohl in Print- als auch in digitaler Fassung erscheinen. Die Nutzung ist sowohl in der universitären Ausbildung als auch in der Weiterbildung an allen drei Universitäten vorgesehen. Die Multilingualität erschließt zudem noch den jeweiligen Sprachraum.

6.EINSTELLUNG DER METHODEN IN DIE METHODENBANK MLOG

Zusätzlich wird der Methodenvorrat in die webbasierte Methodendatenbank mlog (Vgl. Bild

4) eingestellt. Dem Aufbau der Methodendatenbank wurde ein Stufenkonzept zugrunde gelegt (Vgl. dazu [14]):

f Stufe 1: Methodendatenbank als multimediales Lexikon

f Stufe 2: Erweiterung um mathematische Berechnungsmöglichkeiten für Einzelmethoden

f Stufe 3: Verknüpfung der Einzelmethoden zu Berechnungsketten und -netzen

Die erste realisierte Ausbaustufe (Vgl. dazu u.a. [15] und [16]) ermöglicht die Recherche in mit Texten und Multimedia-Bausteinen hinterlegten Logistikmethoden und stellt somit eine erste Wissensbasis über Logistikmethoden zur Verfügung. Die Suche erfolgt nach dem Methodennamen, nach Index, Stichwörtern und Branchen. Der Nutzer kann sich

am Bildschirm über die Methode informieren, er kann sie auf Wunsch als pdf-File herunterladen oder aus- drucken. Dabei werden Textbeschreibungen durch Formeln, Grafiken und Fotos, Videos, Literaturverweise und externe Linksergänzt. DerfunktionaleArbeitsstand der Methodendatenbank ist unter <http://ifs1180.mb.uni-magdeburg.de/~mlog/einsehbar>.

Dabei wurde berücksichtigt, dass im Hinblick auf die Einbindung in die E-Learning- Umgebung, das Methodenwissen so strukturiert und aufbereitet werden muss, dass für den Lernenden ein selbständiges Recherchieren und Entscheiden möglich wird.

Eine elektronische Methodensammlung muss deshalb neben den Methoden auch das Kon- textwissen (relevante Grundlagen, Erklärungen und Hintergrundwissen) sowie rechnerische Anwendungsbeispiele und möglichst auch Softwarewerkzeuge zur Durchführung von Be- rechnungen, Variantenrechnungen usw. umfassen.

Zusätzlich sind fachbezogene Systematisierungen hilfreich. Dies soll am Beispiel der Bewer- tungsmethoden verdeutlicht werden. (Vgl. Tabelle 4) Bewertungen werden in vielen Berei- chen durchgeführt und haben zu einer großen Vielfalt an Bezeichnungen von Bewertungs- methoden geführt. Die Selektion von Bewertungsmethoden aus der Logistikmethodenbank ermöglicht und erfordert eine Systematisierung. Die Tabelle 4 zeigt eine Arbeitsversion, die sicher in der nächsten Zeit noch kritisch erprobt werden muss.

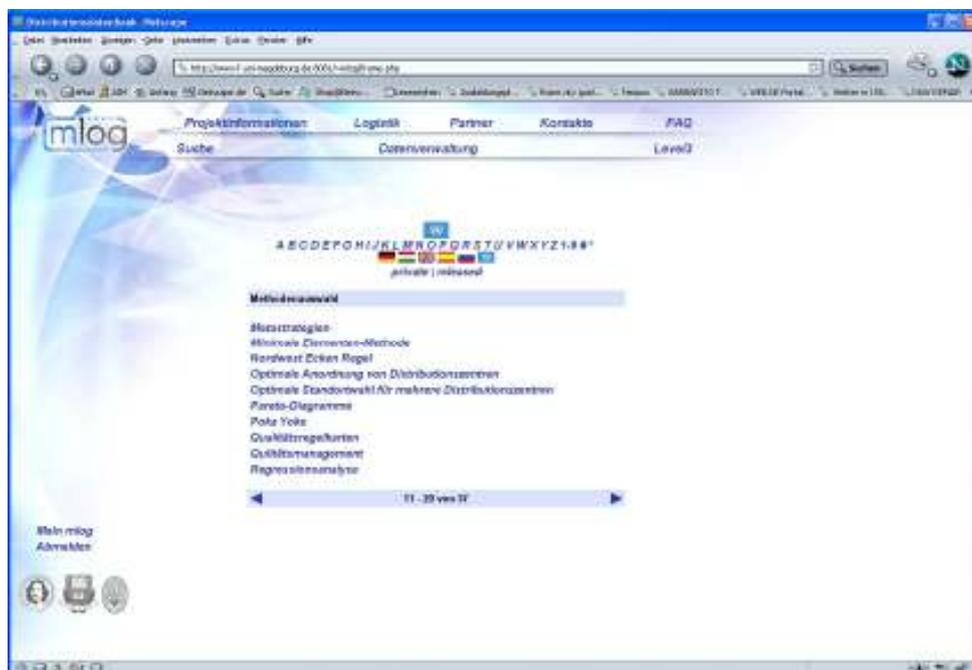


Bild 4 – Blick in die Methodendatenbank mlog

Die derzeitige praktische Nutzung von mlog in der 1. Ausbaustufe erfolgt an der Universität Magdeburg in folgender Form:

- Übergabe von Selbststudienaufgaben an Studierende (Beispiel: Erarbeiten der Me- thode der Ereignisgesteuerten Prozesskette EPK)

- Nutzung des Methodenwissens für Projektarbeiten (Beispiel: Recherchieren und Nutzen von Bewertungsmethoden)
- Nutzung von Prototypen problem- und aufgabenorientierter, multimedialer Lernarrangements als Belegaufgabe zum Erwerb eines Übungsscheins (Bsp. Kennzahlenbeleg Fahrradfabrik innerhalb der Lehrveranstaltung Logistikprozessanalyse)
- Erweiterung der Wissensbasis durch Studien- und Diplomaufgabenstellungen

Tabelle 6 – Übersicht über eine Systematisierung von Bewertungsmethoden (Auszug)

Einteilungsaspekte		Methodenbeispiele	
Bewertung argumentativer Aspekt (ARGUMENTE)		<ul style="list-style-type: none"> • Vorteile/Nachteile • Stärken/Schwächen • Chancen/Risiken • Delphi-Methode 	
Bewertung zeitabhängiger Aspekt (ZEIT)		<ul style="list-style-type: none"> • S-Kurve • Erfahrungskurve • Trendprognose der Umfeldentwicklung • Exponentielle Glättung • Szenario-Technik (Best-Case; Worst-Case; Trend-Extrapolation) 	
Bewertung von Zusammenhängen (KLASSEN, TYPEN)	1 Merkmal	<ul style="list-style-type: none"> • Paretomethoden (z.B. ABC; XYZ; Kosten; Häufigkeit; GKM) 	
	2 bis 3 Merkmale	<ul style="list-style-type: none"> • Portfolio • SWOT-Matrix 	
	mehr als 2 Merkmale	gleichzeitig	<ul style="list-style-type: none"> • Clusteranalyse
		aufeinander-folgend	<ul style="list-style-type: none"> • Hierarchische Klassenbildung (Gruppierung)
	Zeitunabhängig	<ul style="list-style-type: none"> • Morphologischer Kasten 	
Bewertung von Zielvorgaben (SOLL-IST)		<ul style="list-style-type: none"> • KO-Verfahren • Checklisten • Benchmarking • Zielerfüllungsgrad • Balanced Scorecard (BSC) • Quality Function Deployment (QFD) • Logistic Function Deployment (LFD) • Messung von Kundenpräferenzen 	

Bewertung quantifizierbarer Aspekte (NUT- ZEN, KOSTEN)	nicht monetärer Nutzen / Aufwand	<ul style="list-style-type: none"> • Nutzwert-Analyse • Aufwandswertanalyse • Nützlichkeitsanalyse • Nutzwert-Kosten-Analyse • Erlös-Aufwandswert-Analyse • Bewertung mit Ökopunkten
	Dynamische Wirtschaftlichkeitsrechnung	<ul style="list-style-type: none"> • Kapitalwertmethode • Interne Zinswertmethode • Annuitätenmethode • Dynamische Amortisierungsdauer • Kalkulationsprinzip • Ersatzzeitpunktbestimmung • Nutzungsdauer
	Statische Wirtschaftlichkeitsrechnung	<ul style="list-style-type: none"> • Kostenvergleichsrechnung • Gewinnvergleichsrechnung • Rentabilitätsrechnung • Break-Even-Analyse • Portefeuilleeffektanalyse • Erlösrechnung • Finanzplanrechnung
	Unternehmensbewertung	<ul style="list-style-type: none"> • Zukunftserfolgswertmethode • Ertragswertmethode • Substanzwertmethode • Übergewinnabgeltung
	Bewertung von Umweltaspekten	<ul style="list-style-type: none"> • Abfallbilanz • Rohstoffbilanz • Schadstoffbilanz
Bewertung des Risikos (RISIKO)		<ul style="list-style-type: none"> • FMEA oder FMECA • Ereignisablaufanalyse • Fehlerbaumanalyse • Parts-Count-Methode • Parts-Stress-Methode • Markoff-Verfahren
Bewertung der Empfindlichkeit des Systems / der Lösung (EMPFINDLICHKEIT)		<ul style="list-style-type: none"> • Sensitivitätsanalyse • Sensibilitätsanalyse
Bewertung von Kausalzusammenhängen (KAUSALITÄT)		<ul style="list-style-type: none"> • Baumdiagramm • Netzplan • Ursache-Wirkungsdiagramm • Problem-Entscheidungsplan

Literatur: 1. GLISTAU, E.; MRECH, H.: Methodenbanken und ganzheitliche Planspiele – Ausbildung zu kontinuierlichem Lernen in der Ingenieurwissenschaft; LEARNTEC '2000.

Vortrag, Messestand und Tagungsband. **2.** *COELLO, N.; WISWEH, L.; MACHADO, C.*: (2001) Statistische Prozesslenkung mit Qualitätsregelkarten Prozess- oder Toleranzbezogene Bestimmung der Eingriffsgrenzen? Maschinenbau Preprint-Reihe der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg. Preprint Nr. 1/2001 S. 1 – 16. **3.** *CSELÉNYI, J.; ILLÉS, B.*: Einige Probleme der Logistik der Qualitätssicherung. 13th Conference BIAM 96; 18-20 June 1996. Zagreb. **4.** *COELLO MACHADO, N.; ILLÉS, B.; GLISTAU, E.*: Logistik und Qualitätsmanagement. Tagungsband microCAD 2004; Sektion L: Material Flow Systems, Logistical Informatics. S. 21 bis 27: ISBN 963 661 608 6 ö. **5.** *COELLO MACHADO, N.; ILLÉS, B.; GLISTAU, E.*: Qualitätssicherung der Logistik und Logistik in der Qualitätssicherung – Wechselwirkungen und Effekte; Internationale Maschinenbaukonferenz COMEC 2004; Santa Clara / Kuba. ISBN 959-250-147-5. **6.** *COELLO MACHADO, N.; ILLÉS, B.; GLISTAU, E.*: Qualitätssicherung in der Logistik, Tagungsband microCAD 2005; Sektion O: Material Flow Systems, Logistical Information Technology. S. 73 bis 79: ISBN 963 661 646 9 ö. **7.** *ILLÉS, Béla*: A karbantartási logisztika, a minőségbiztosítási, logisztika alapjai, folyamatainak matematikai modellezése. Habilitationsschrift; Universität Miskolc; März 2005. **8.** *MAGNUSSON, K.; KROSLID, D.; BERGMAN, B.*: Six Sigma umsetzen. Hanser Fachbuch 2004; ISBN 3446216332. **9.** *REHBEHN, R.; YURDAKUL, Z. B.*: Mit Six Sigma zu Business Excellence. Strategien, Methoden, Praxisbeispiele. 1. Aufl. Publicis MCD Verlag 2003. ISBN 3895781851. **10.** *TÖPFER, A. et al.*: Six Sigma. 3. Aufl. Springer, Berlin 2004. ISBN 3540218998. **11.** *ZIEMS, D.*: Technische Logistik I / II; Umdruckmaterial zu den Vorlesungen im SS 2006 und im WS 2005/06 an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg. **12.** *WIENDAHL, H.-P. (Hrsg.)*: Erfolgsfaktor Logistikqualität: Vorgehen, Methoden und Werkzeuge zur Verbesserung der Logistikleistung, Springer Verlag Berlin / Heidelberg / New York 2002. **13.** *ILLÉS, B.; COELLO MACHADO, N.; GLISTAU, E.*: Qualitätsmanagement in der Logistik – Schwerpunkt einer trilateralen Forschungskooperation Tagungsband microCAD 2006; Sektion O: Material Flow Systems, Logistical Information technology. S. 57 bis 64: ISBN 963 661 700 7 .Ö. **14.** *GLISTAU, E. u.v.a.*: Lastenheft – Wissensplattform. Erstellung einer erweiterungsfähigen Wissensbasis für Logistik-Methoden. Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg. 3. Ausbaustufe Stand 2005. **15.** *GLISTAU, E.; COELLO MACHADO, N.; ILLÉS, B.*: Konzept und Nutzung der multilingualen Methodenbank mlog für die Logistikausbildung. Tagungsband microCAD 2006. Sektion O: Material Flow Systems, Logistical Information technology. S. 39 bis 47. ISBN 963 661 700 7 Ö. **16.** *WERNER, F.; GLISTAU, E.*: mlog – Magdeburg View of a method database for logistics. Tagungsband microCAD 2006. Sektion O: Material Flow Systems, Logistical Information technology. S. 215 bis 220. ISBN 963 661 700 7 Ö. **17.** *LIEBIG, D.* Nutzung von Qualitätsmanagementmethoden in der Logistik auf der Basis von Fehlernomenklaturen. Studienarbeit im Studiengang Wirtschaftsingenieurwesen Logistik. Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg. 2005. Betreuer: Prof.Dr.-Ing. Coello Machado, Dr.-Ing. Glistau.

J. KUNDRÁK, Prof. Dr., **C. FELHŐ**, Miskolc, Hungary

THEORETICAL SURFACE ROUGHNESS OF SURFACES MACHINED BY SINGLE POINT CUTTING TOOLS

У статті представлений один з можливих методів теоретичного визначення шорсткості поверхні за допомогою математичного моделювання. Визначення параметрів шорсткості було зроблено для відомої геометрії інструмента. Також визначені зв'язки між теоретичною й вимірюваною величиною шорсткості обробленої поверхні даної геометрії інструмента.

В статье представлен один из возможных методов теоретического определения шероховатости поверхности с помощью математического моделирования. Определение параметров шероховатости было сделано для известной геометрии инструмента. Также определены связи между теоретической и измеряемой величиной шероховатости обработанной поверхности данной геометрии инструмента.

In the article one possible method of theoretical surface roughness determination with help of a general mathematical model is introduced. The determination of surface roughness parameters (R_a , R_z , R_{max}) was done for a given tool geometry. We also created relations between theoretical and measured values of the roughness of surfaces machined with this tool geometry.

1. Introduction

Accuracy of parts and quality of machined surfaces should be ensured in the finishing operation. In this paper we deal with the geometry of surface, which is one of the important characteristics of surface quality and determinative of tribological properties of working surfaces. Production engineers can only plan manufacturing procedures used in finishing operations correctly, if the roughness index values of surface for the chosen procedure and their changing gears to technological data and tool geometry (factors which determining the roughness) used in the given procedure are known.

One possible method of the determination of the prospective roughness on machined surfaces is the use of roughness values determined on grounds of theoretical roughness.

Various modeling procedures and techniques presented in Table 1 shows, how comprehensive researches goes on to determine the surface roughness, surface quality and surface integrity [2].

Examinations and results will be introduced was done by a solution which implements more targets. The essence of this solution is that it is determine the theoretical indexes and set up connections with real indexes.

The calculation method used by us [1] was endeavored for:

the model should be general, to the effect that it should be capable to determine all roughness values which can be derived by theoretical way;

cutting tools with various geometries can be compared in the basis of roughness values (hereby these can be redeemed or substituted)

the cutting-ability of the material can be ranked by comparison of theoretical and real values the roughness values can be automatically planned for tools with arbitrary profiles

Table 1 – Major research groups dealing with surface roughness and part accuracy determination [2]

Currently Active Major Research Groups		Models for Machining performance	
		Surface roughness, surface integrity	Part Accuracy
Modelling tools and techniques	Analytical	Altintas, Armarego, Bouzakis, Colding, Grabec, Klocke, Koren, Oxley, Rehsteiner	Ostafiev, Patri
	Numerical	Altan, Altintas, Bouzakis, Koren, Leopold, Reutsch, Ueda	
	Experimental	Bouzakis, Colding, Grabec, Klocke, Koren, Le Maitre, Leopold, Nakayama, Narutaki, van Luttervelt, Warnecke	Ostafiev, Patri, van Luttervelt
	AI-based	Fang, Leopold, Li, Rehsteiner, Warnecke	van Luttervelt
Summary of Present status		<ul style="list-style-type: none"> - Very limited predictive modeling attempts. - Purely geometric relationships - Complex relationship noted between surface roughness and operational parameters, work materials and chip breaker types. 	<ul style="list-style-type: none"> - Closely related with and dependent on other macining performance measures. - Traditional correlation with machine tool vibrations.
Future directions		<ul style="list-style-type: none"> - Developing predictive models - Establishing tool-chip interactions with the cutting conditions and corresponding material flow behavior. 	<ul style="list-style-type: none"> - Urgent need for modeling attempts on part accuracy. - Analytical modeling of a machining system for process and structural stiffness.

2. General mathematical model for the cutting edge

A cutting tool with general profile in the tool base plane (geometrical model) is designed, whereof the edge geometry of any realistically possible tool can be deducted. For the mathematical description the cutter should be placed into an x-y coordinate system, which plane is match to the base plane, and the pitch point is in the zero point. The cutter is described by emplacement angles and lengths of cutting edges (Figure 1) [1].

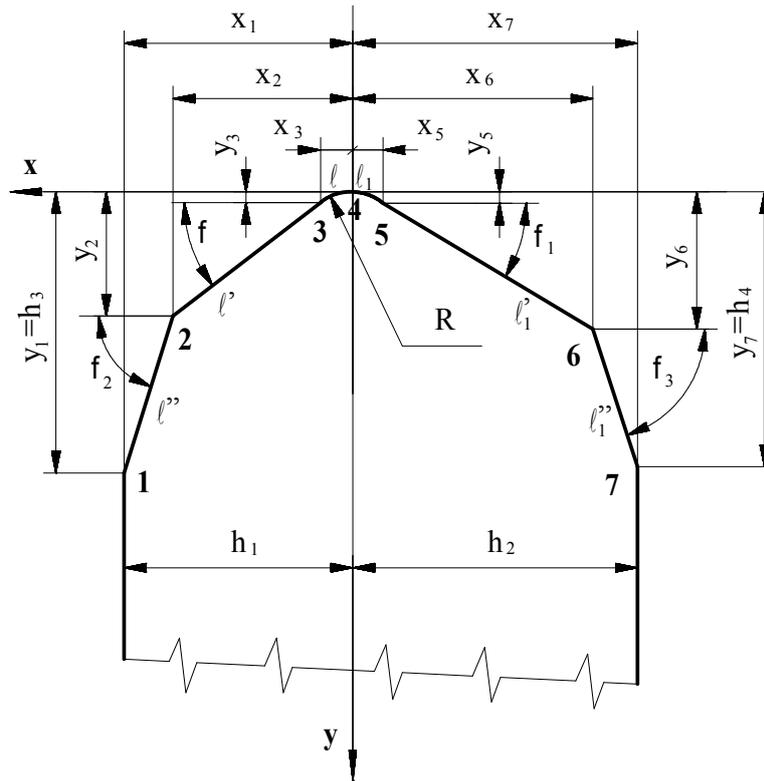


Figure 1 – Typical points of the general profile

The essence of the mathematical model developed by Kunderák J. thus the following:

1. Design a fictional complex cutting tool (which has all of the possible edge sections) in the tool base plane (xy-coordinate plane).
2. Edge sections of the complex tool were given by $y=f(x)$ functions, while their intersection points with xy-coordinates.
3. The edge geometry for every specific tool is deducted from this general mathematical model by the practical substitution of function parameters.

The general cutter profile can be described in the following form

$$L = f(l, l', l'', l_1, l_1'') \quad (1)$$

The edge sections can be divided into two groups: main and auxiliary edges.

Description of main edges:

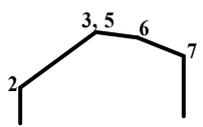
$$\begin{aligned}
 \ell &= R - \sqrt{R^2 - x^2} & \text{where:} & \quad x_4 \leq x < x_3 \\
 \ell' &= \operatorname{tg} \kappa_{r1} \cdot x + b & \text{where:} & \quad x_3 \leq x < x_2 \\
 \ell'' &= \operatorname{tg} \kappa_{r2} \cdot x + b_2 & \text{where:} & \quad x_2 \leq x < x_1
 \end{aligned} \tag{2}$$

Description of auxiliary edges:

$$\begin{aligned}
 \ell_1 &= R - \sqrt{R^2 - x^2} & \text{where:} & \quad x_5 \leq x < x_4 \\
 \ell'_1 &= \operatorname{tg} \kappa_{r1} |x| + b_1 & \text{where:} & \quad x_6 \leq x < x_5 \\
 \ell''_1 &= \operatorname{tg} \kappa_{r2} |x| + b_3 & \text{where:} & \quad x_7 \leq x < x_6
 \end{aligned} \tag{3}$$

The specific configurations can be deduced from the cutter with general profile, a cutter with facet is shown in Table 2.

Table 2 – Cutting tool profile variant derived from the general profile

Configuration (edge forms)	Edge section (length) values	Parameters of the edge	Description of the edge
	$\ell = 0;$ $\ell'' = 0; \ell_1 = 0;$	$R=0$ $\varphi < 90^\circ;$ $\varphi_1 < 90^\circ;$; $\varphi_2 = 90^\circ;$ $\varphi_3 < 90^\circ;$	$L = f(\ell', \ell'_1, \ell''_1)$

3. Determination of theoretical value of surface roughness

The micro-geometrical profile and the roughness of the machined surface can be described by three kinds of index numbers: real, theoretical and measured values.

We consider as approximate information to the real (actual) surface in practice the section-scan probing methods in the profile section, such as measurements done by touch (diamond pin) or without touch (focused laser beam).

More researchers have already dealt with the determination of theoretical surface roughness values. They have determined the calculated roughness parameters by analytical formulas. It is necessary to deduct the formulas gained by this way separately for each cutter type, therefore it is a common characteristic for the worked out methods, that they are primarily limited to cutters with round pitch and to the determination of maximum irregularities [3].

Advantage of the previously introduced model is that it permitted the determination of theoretical values of roughness parameters (R_a , R_{max} , R_z , t_p) for any tool with determined edge which can be formed in the reality.

Theoretical $R_{max} = R_z$, R_a , t_p (t_p which belongs to arbitrary cropping height) values can be calculated on the basis of tool geometry interpreted in tool base plane and of the feed rate.

Theoretically evolving roughness profiles for the faceted tool can be seen in Table 3.

Table 3 – Possible roughness variations in the base plane for the given tool configuration

Possible theoretical roughness variations		

Hereinafter a software will be introduced, which can help to determine most important roughness parameters (R_{max} , R_z , R_a , t_p) based on Kundrák's general mathematical model.

4. Software for calculation of theoretical roughness indexes

Using variable edge parameters and technological data, the completed software is able to define the theoretical indexes of surface roughness for an edge-configuration chosen by the user. For data input and display of the final results it provides graphic user's surface, the starting page of which can be seen in Figure 2.

From the general edge profile, having nine derivative configurations it is capable to define the values of R_{max} , R_z , R_a , t_p theoretical indexes. Figure 3 shows the result of run belonging to a tool configuration introduced before. Apart from this, the program is capable to find mathematical relations between theoretical values and technological and tool-geometrical data and also between the calculated theoretical and measured values. Also it is capable to draw the curve of the function describing the relationship between the data in the case of proper parameters.

5. Definition of roughness of cut surfaces

Hereinafter the relation between the theoretical and realistic roughness will be shown through the results of cutting experiments made by two different tools.

The most accurate information about the real surface roughness can be obtained by measurements. Theoretical roughness of the surface is a more inaccurate approximation of the reality, which is determined mathematically

with different negligence. According to observations theoretical and measured values of roughness vary in similar trends, hence it is possible to search for relations between the theoretical roughness calculated in advance and its measured values in the range of investigated technological data. Measured data vary in a determined trend as functions of theoretical values; therefore a mathematical relation can be established between them with the help of regression analysis.

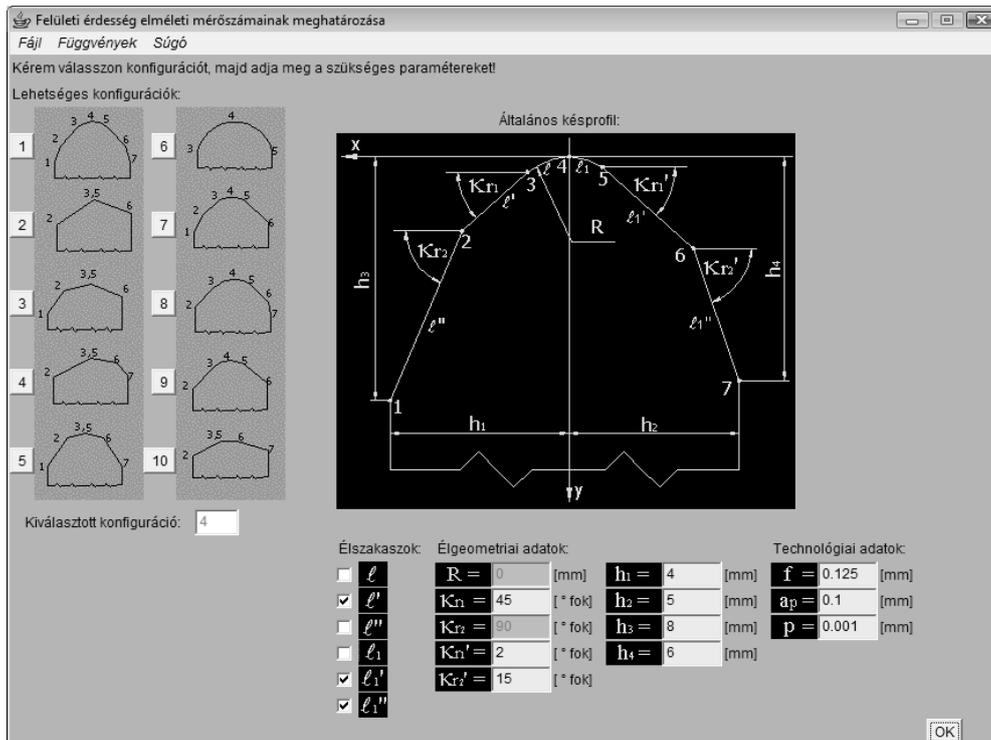


Figure 2 – The starting screen of the program made for calculating the theoretical roughness

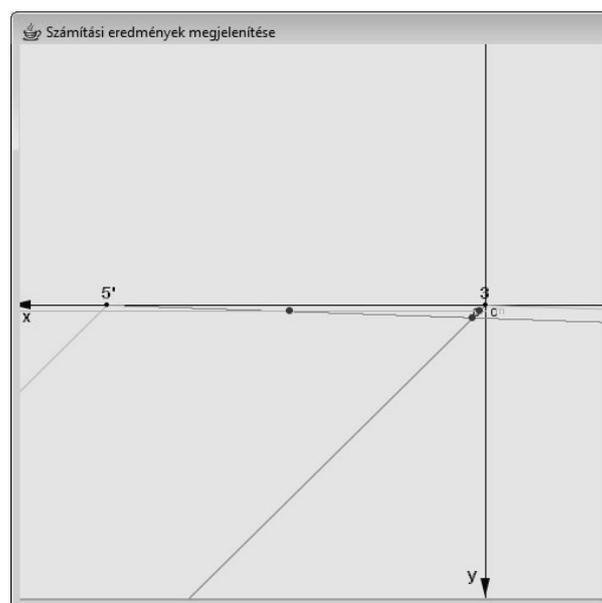


Figure 3 – The graphic display of the theoretical roughness calculated by the program

The defined relationships make the design ability of the cut surface's roughness possible.

However, it is worth to examine the relations between theoretical and real roughness values for various reasons:

the closer the real value is to the theoretical one, the easier it is to cut the part (material)

assists to decide that which geometry with different constructions but resulting the same theoretical roughness results closer theoretical values to real ones.

5.1 Experimental environment

Our experiments were made by the following conditions:

Experimental conditions:

- Workpiece:

- material: 100Cr6
- hardness: HRC 62 ± 2

- Tools:

- material grade: CBN Composite 01 (K01) and Composite 10 (K10)
- geometry: : $\gamma_o = -5^\circ$; $\alpha_o = \alpha_o' = 15^\circ$; $\lambda = 0^\circ$; $\kappa_{r1} = 45^\circ$; $\kappa_{r1}' = 2^\circ$; $\kappa_{r2}' = 15^\circ$;
 $b_g = 0,3$ mm

- Machine tool: universal lathe, ИЖ250, E400-1000

- Technological data:

- $v = 60$ m/min;
- $a = 0,1$ mm;
- $f = 0,025 - 0,125$ mm/rev

- Measuring instruments: S8P type Perthometer

- measure head type: Focodyn laser measure head
- measure length: 1,75 mm
- base length: 0,8 mm
- diameter of the focused laser beam: 1 μ m

5.2 Experimental results

• Theoretical values

The theoretical values of roughness indexes were defined by the software and the method outlined at the beginning of this article (Table 4).

Table 4 – Theoretical roughness values

Feed rate, mm/rev	Theoretical roughness characteristics, μ m		
	R_{aT}	R_{zT}	R_{maxT}
0.025	0.21	0.84	0.84
0.05	0.42	1.68	1.68
0.075	0.63	2.53	2.53
0.1	0.84	3.37	3.37
0.125	1.05	4.21	4.21

- The measured roughness values of the cut surface

Under the above mentioned conditions and cutting data the experiments were made with both of the tools with different feeds. On the machined surfaces the values of R_{\max} , R_z , R_a roughness indexes were measured. The average of the measuring results is summarized in Table 5.

Table 5 – Average of measuring results for the two tools

Feed rate, mm/rev	Roughness characteristics, μm					
	Composite 10			Composite 01		
	R_a	R_z	R_{\max}	R_a	R_z	R_{\max}
0.025	0.52	3.00	4.50	1.00	5.00	6.80
0.05	0.85	4.50	6.00	1.20	5.60	7.40
0.075	1.12	5.50	6.90	1.30	6.00	7.80
0.1	1.35	6.50	7.80	1.35	6.50	8.00
0.125	1.50	7.50	8.80	1.40	6.80	8.20

- Evaluation of experimental results

When evaluating the results, we would like to draw your attention to the following:

- The values of R_{zT} and $R_{\max T}$ are the same, it comes from the method of calculation;
- theoretical value – as cutting was done by tools with identical edge geometry – is the same for each tool;
- the character of the theoretical and real roughness changes is the same.

Figure 4 shows the comparison diagrams for the three examined roughness characteristics.

The approximation can be made by $R_{(a,z,\max)R} = R_{(a,z,\max)T} + C_{(a,z,\max)}$, relation, which can provide a relatively good approach. But the approximation below is more accurate:

$$R_{(a,z,\max)R} = C_{1(a,z,\max)} \cdot R_{(a,z,\max)T}^{C_{2(a,z,\max)}} \quad (4)$$

Therefore by the latter is provided the mathematical relation with which, and with the help of the theoretical values, the real roughness can be designed. The definition of C_1 , C_2 constants was done with the help of regression analysis. The approximation accuracies of equations were given by the value of the coefficient of determination (R^2).

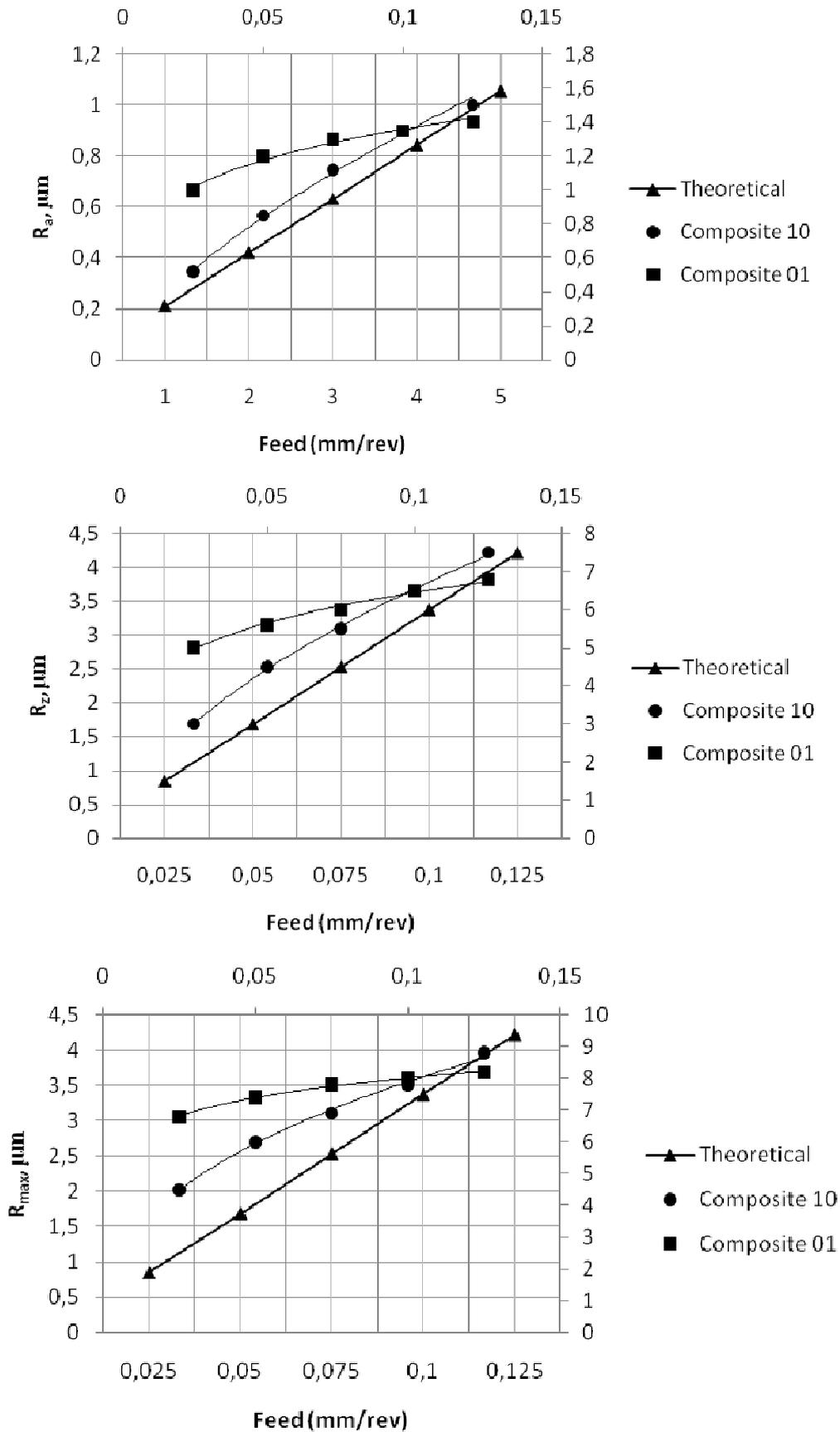


Figure 4 – Comparison of theoretical roughness values and measured roughness values

For Composite 10 tool:

$$\begin{aligned}R_{aR} &= 1,493 \cdot R_{aT}^{0,667}; & R^2 &= 0,997 \\R_{zR} &= 3,311 \cdot R_{zT}^{0,562}; & R^2 &= 0,999 \\R_{\max R} &= 4,808 \cdot R_{\max T}^{0,407}; & R^2 &= 0,997\end{aligned}\quad (5)$$

For Composite 01 tool:

$$\begin{aligned}R_{aR} &= 1,406 \cdot R_{aT}^{0,209}; & R^2 &= 0,982 \\R_{zR} &= 5,117 \cdot R_{zT}^{0,191}; & R^2 &= 0,989 \\R_{\max R} &= 6,950 \cdot R_{\max T}^{0,117}; & R^2 &= 0,997\end{aligned}\quad (6)$$

Conclusion

In the examined cases, with the help of the elaborated mathematical model and/or calculation method, the real roughness can be determined with good approach. Our plan for the future is to further develop this process for description of the theoretical values of 3D roughness values and also for determination of the expected roughness values.

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.** *Kundrak J.*: Increasing the Effectiveness of Machining by Application of Composite Tools in boring of cylindrical and Polygon Surfaces (in Russian). CSc Dissertacion. Tula 1986. p. 315. **2.** *C.A. van Luttervelt, T.H.C. Childs, I.S. Jawahir, et al.*: Present Situation and Future Trends in Modelling of Machining Operations. Progress Report of the CIRP Working Group ‘Modelling of Machining Operations’; Keynote Paper, Annals of the CIRP Vol. 47/2/1998, pp.: 587-626. **3.** *Maňková I, Marková G.*: Comparative Assessment of Hard Turned Surfaces Microgeometry by 2D and 3D Parameters. Acta Mechanica Slovaca, vol. 13, No. 2/2009, p. 86-93.

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

УДОСКОНАЛЕННЯ СПОСОБІВ ЗАКРІПЛЕННЯ РІЖУЧИХ ПЛАСТИН З НАДТВЕРДИХ МАТЕРІАЛІВ

В статті розглянуті існуючі різноманітні конструкції вузлів закріплення багатограних і круглих пластин з НТМ і твердих сплавів механічним способом і запропонована нова конструкція і технологія забезпечення надійного кріплення, особливо для високообертового інструменту.

В статье рассмотрены существующие разнообразные конструкции узлов закрепления многогранных и круглых пластин из СТМ и твердых сплавов механическим способом и предложена новая конструкция и технология обеспечения надежного крепления, особенно для высокооборотистого инструмента.

The article deals with a variety of existing constructions of mechanical fastening units of the many-sided and round plates made of superhard materials and hard alloys. The new design and technology of provision the reliable fastening are also proposed, which are especially favorable for fast rotating tool.

Вступ

Закріплення пластин з полікристалічного кубічного нітриду бору через ряд властивостей матеріалу (хімічна стійкість, незмочуваність розплавами металів, висока твердість тощо) викликає необхідність застосовувати наступні способи:

- гаряче пресування в суміші порошків кольорових металів;
- заливка розплавленим металом;
- завальцовка і зачеканка в сталеві втулки.

Ці способи базуються на тому, що метал і залишкові пружні зусилля через сили тертя утримують пластини.

Крім того, розрізняють способи вакуумної пайки на основі адгезійноактивних припоїв (використання молекулярної взаємодії).

За інформацією д.т.н., проф. Клименка С.А. при цих способах не вдається уникнути браку, який може складати до 30%.

Другим суттєвим недоліком таких способів закріплення є можливість повторного використання інструменту (в результаті зношування) тільки після перезаточування, кількість якого обмежена малими розмірами пластинок.

Експериментами і дослідженнями в роботі [1] було доведено, що найбільш перспективним способом закріплення шліфованих пластинок з НТМ є механічний.

Різними науково-дослідними організаціями і конструкторами заводів-виготвачів інструменту розроблено велику кількість різноманітних конструкцій механізмів закріплення, дослідження яких здійснено в Університеті дружи народів ім. П. Лумумби [2]. На розробленій установці для виміру контактних деформацій стику «полікристал з композиту 01 – гніздо вставки» були проведені порівняльні дослідження наступних конструкцій (рис. 1):

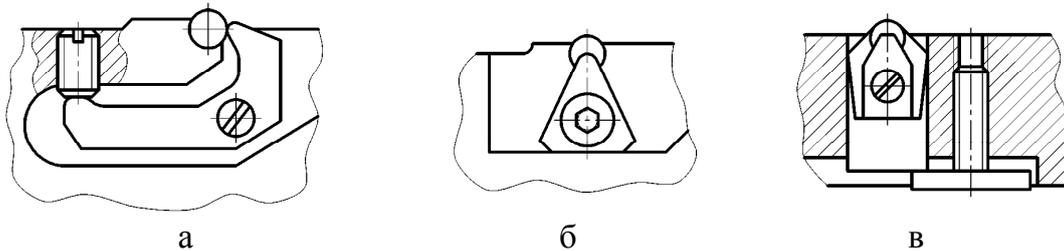


Рисунок 1 – Вузли закріплення полікристалу з композиту 01 в гнізді вставки:
 а – коливальним важелем; б – прихватом зверху;
 в – прихватом зверху у проміжній вставці

Стенд надав можливість отримати амплітудно-частотні характеристики вузлів закріплення при частоті збуджуючої сили $f = 1 \dots 35$ кГц, статичному навантаженні 1 Н.

Найкращі результати з точки зору найменших пікових амплітуд віброприскорень отримані для варіанту з коливальним важелем (рис. 1, а).

В роботі [3] з посиланням на стандарти (ГОСТ 26611-85, ГОСТ 26612-85) наведена наступна конструкція вузла закріплення пластини, яка базується на бокові поверхні глухого гнізда тримача і притискається до опорної поверхні у вигляді закріпленої твердосплавної пластини (рис. 2).

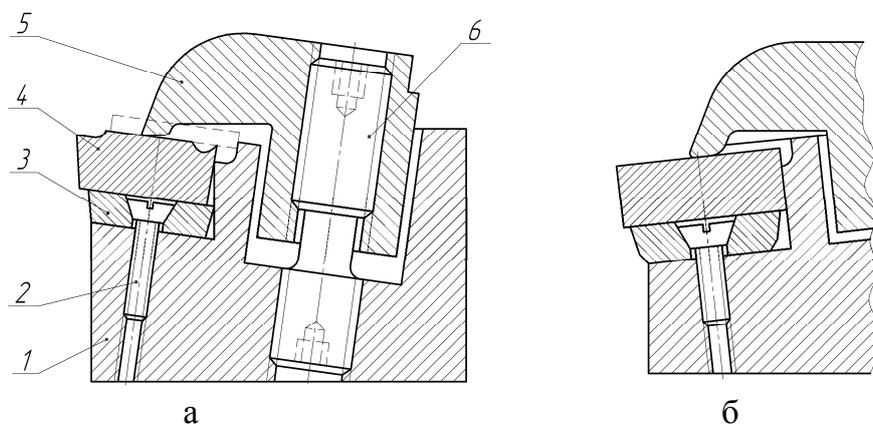


Рисунок 2 – Вузли закріплення пластин, що мають задній кут (а) і тих, що не мають задніх кутів (б)

До корпусу 1 тримача гвинтом 2 закріплена пластина (підкладка) 3, на яку змонтована ріжуча пластина 4 з НТМ і закріплена прихватом 5 за допомогою спеціального гвинта 6, який має дві різні різні кроками (диференціальний гвинт).

В Інституті надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля розроблена інша конструкція вузла закріплення пластини [4], наведена на рис 3.

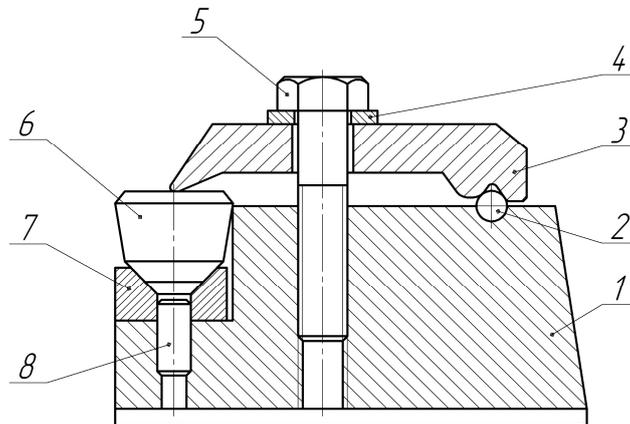


Рисунок 3 – Вузол закріплення пластини з НТМ: 1 – тримач; 2 – кулька; 3 – прихват; 4 – шайба; 5 – болт; 6 – ріжуча пластина; 7 – підкладка; 8 – штифт

Самовстановленню прихвата 5 при затисканні ріжучої пластини сприяє опора, роль якої грає кулька 2.

В роботі [5] наведено ще декілька способів механічного закріплення пластин з НТМ в різцях (вставках) і в корпусах торцевих фрез з використанням прихватів (рис. 4).

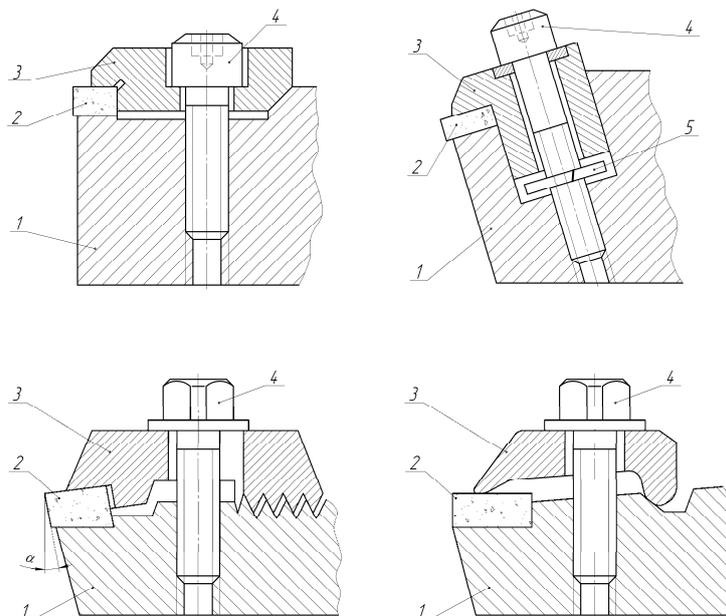


Рисунок 4 – Різноманітні варіанти затискання ріжучої пластинки при хватами: 1 – корпус; 2 – ріжуча пластина; 3 – прихват; 4 – гвинт; 5 – шайба пружна

Ще один спосіб механічного закріплення пластин наведено в роботі [4].

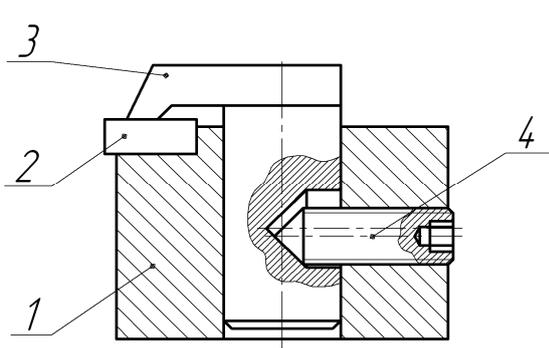


Рисунок 5 – Закріплення прихватом за допомогою гвинта:
1 – корпус; 2 – ріжуча пластина; 3 – прихват; 4 – гвинт

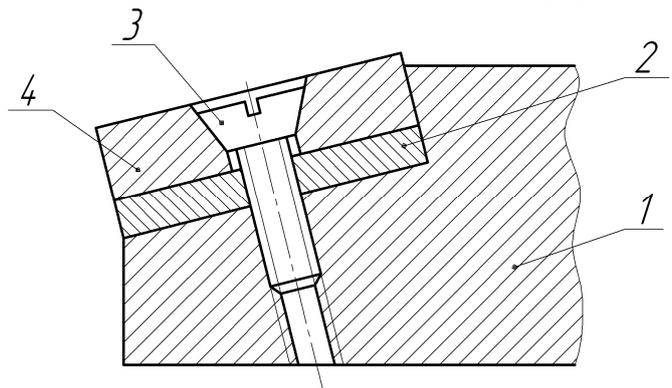


Рисунок 6 – Закріплення пластини гвинтом: 1 – корпус; 2 – опорна пластина;
3 – гвинт;
4 – ріжуча пластина

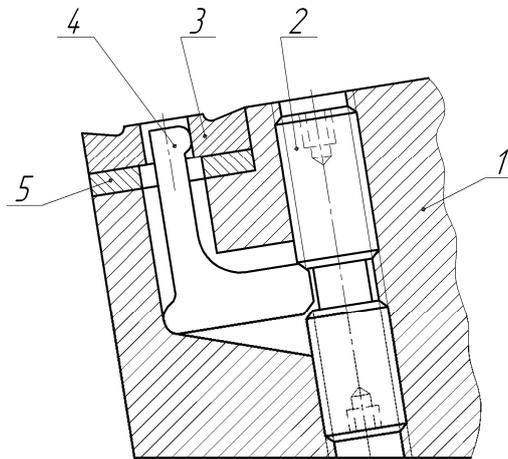


Рисунок 7 – Закріплення пластини через центральний отвір важелем:
1 – корпус; 2 – гвинт; 3 – ріжуча пластина; 4 – важіль; 5 – опорна пластина

Згідно зі стандартом ISO5608 передбачені різноманітні способи закріплення ріжучих пластин з НТМ, а саме:

- закріплення пластин прихватом зверху (спосіб С);
- закріплення пластин через центральний отвір (спосіб Р);
- закріплення через отвір і прихватом (спосіб М);
- закріплення центральним гвинтом (спосіб S);
- закріплення пластин без отворів за бокові поверхні (спосіб D);
- закріплення пластин нерознімним методом (спосіб В).

Найбільшого розповсюдження набули способи С, Р і В.

Вітчизняними інструментальними підприємствами інструмент з механічним закріпленням ріжучих пластин (різці, фрези) практично не виготовляються, тобто використовується виключно спосіб В.

На наш погляд, це викликано в першу чергу необхідними занадто високими вимогами до точності виготовлення всіх без виключення деталей інструменту, а саме корпусу з ложементом під установлювання і закріплення ріжучих пластин з забезпеченням їх точного базування і надійного довготривалого утримання.

Взаємне точне розташування ріжучих елементів у багатолезовому інструменті має визначальний вплив не тільки на працездатність конструкції, але й на точносні параметри і якість оброблених поверхонь. Мова йде про мікронні відхилення розмірів і відповідну якість поверхонь (шорсткість, залишкові напруження тощо), що можливо забезпечити обробкою виключно на високоточному обладнанні з застосуванням сучасних технологічних процесів.

Певний досвід у виготовленні торцевих фрез з механічним закріпленням пластин з НТМ у 80-х роках минулого століття був на Сестрорецькому інструментальному заводі ім. С.І. Воскова і заводі «Фрезер» ім. М.І. Калиніна у Москві.

В світі лідерами у виготовленні інструментів з механічним закріпленням формоутворюючих елементів є велика кількість фірм, таких як Mitsubishi, Kennametal, Sandvik Coromant, Seco, Prament Tools.

Постановка проблеми

Крім точносних проблем, про які вже йшлося, суттєва складність виникає в забезпеченні надійності і безпечності роботи, особливо при швидкісному і надшвидкісному різанні фрезами різноманітних конструкцій.

При використанні існуючих конструкцій механізмів затискання пластин в інструментах для токарної обробки після певного часу експлуатації в результаті вібрацій і релаксаційних процесів відбувається ослаблення затягнутих стиків, але це не впливає суттєво на безпечність процесу через відносну нерухомість різців. Зовсім інші обставини виникають в разі швидко обертового інструменту, коли кожна відокремлена від інструменту частинка може мати швидкість кулі.

Небезпечними є не тільки самі пластинки з НТМ вразі застосування способу кріплення Р і D, але й елементи кріплення (прихвати тощо) при застосуванні способів кріплення С і М.

Всі способи закріплення пластинок, крім не рознімного В, налічують різьові з'єднання, що знаходяться під навантаженням зусилля затиску і змінних переривчасто діючих сил різання при фрезеруванні.

Саме цій проблемі присвячені подальші пошуки нових конструктивних рішень.

Викладення основного матеріалу

Перевагою механічних способів закріплення пластинок з НТМ є, перш за все, можливість використання декількох ріжучих кромки, а для круглих практично всю її колову довжину.

На кафедрі технології машинобудування і конструювання технічних систем ЖДТУ розроблена нова конструкція механізму затискання круглих пластинок з НТМ.

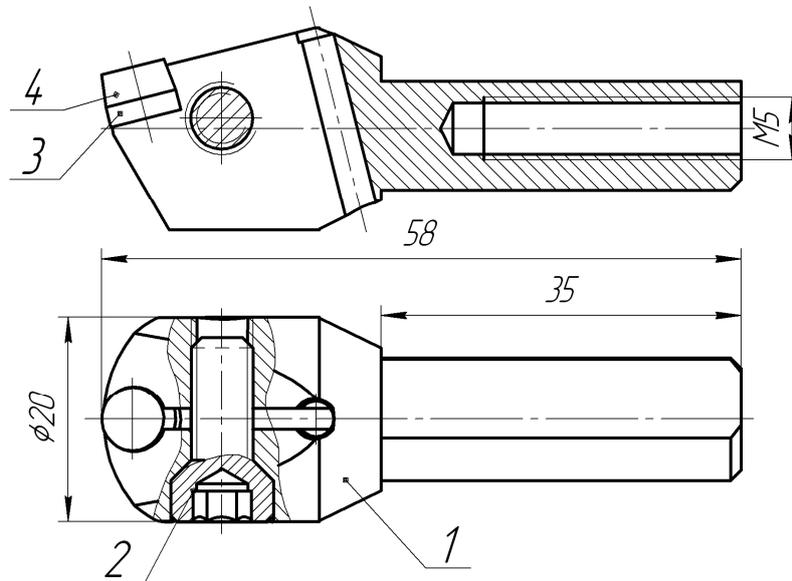


Рисунок 8 – Новий вузол закріплення круглої пластинки з НТМ:
1 – корпус; 2 – гвинт; 3 – підкладка; 4 – ріжуча пластина

Особливістю конструкції є застосування матеріалу з відповідною термообробкою і високо пружними характеристиками для виготовлення корпусу 1. При цьому використовується спосіб закріплення D.

Другою особливістю є те, що запроваджена пластинка кругла конічна.

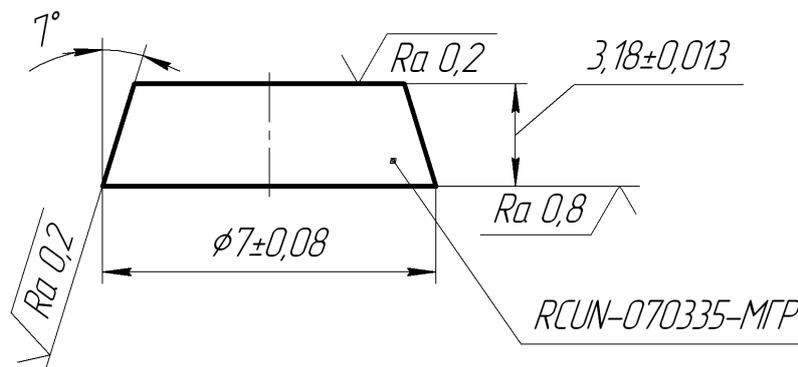


Рисунок 9 – Пластина з полікристалічного надтвердого матеріалу на основі кубічного нітриду бора

Передбачений в пластині задній кут $\alpha = 7^\circ$ використано не за призначенням. Задній кут утворюється за рахунок нахилу передньої поверхні (при $\gamma = -14^\circ$) – зворотної сторони пластини. Під пластиною з НТМ передбачена циліндрична підкладка 2 з ВК8.

Утримання ріжучої пластини з одночасним притисканням її до опорної підкладки здійснюється за рахунок пружності пелюстків 3 і 4, а також зусилля стискання гвинтом 5.

Навіть при ослабленій затяжці гвинта 5 не відбувається руйнування ріжучого елемента і виникнення небезпечної ситуації.

Схема, розрахунок діючих сил та деяких конструктивних розмірів наведені на рис. 10.

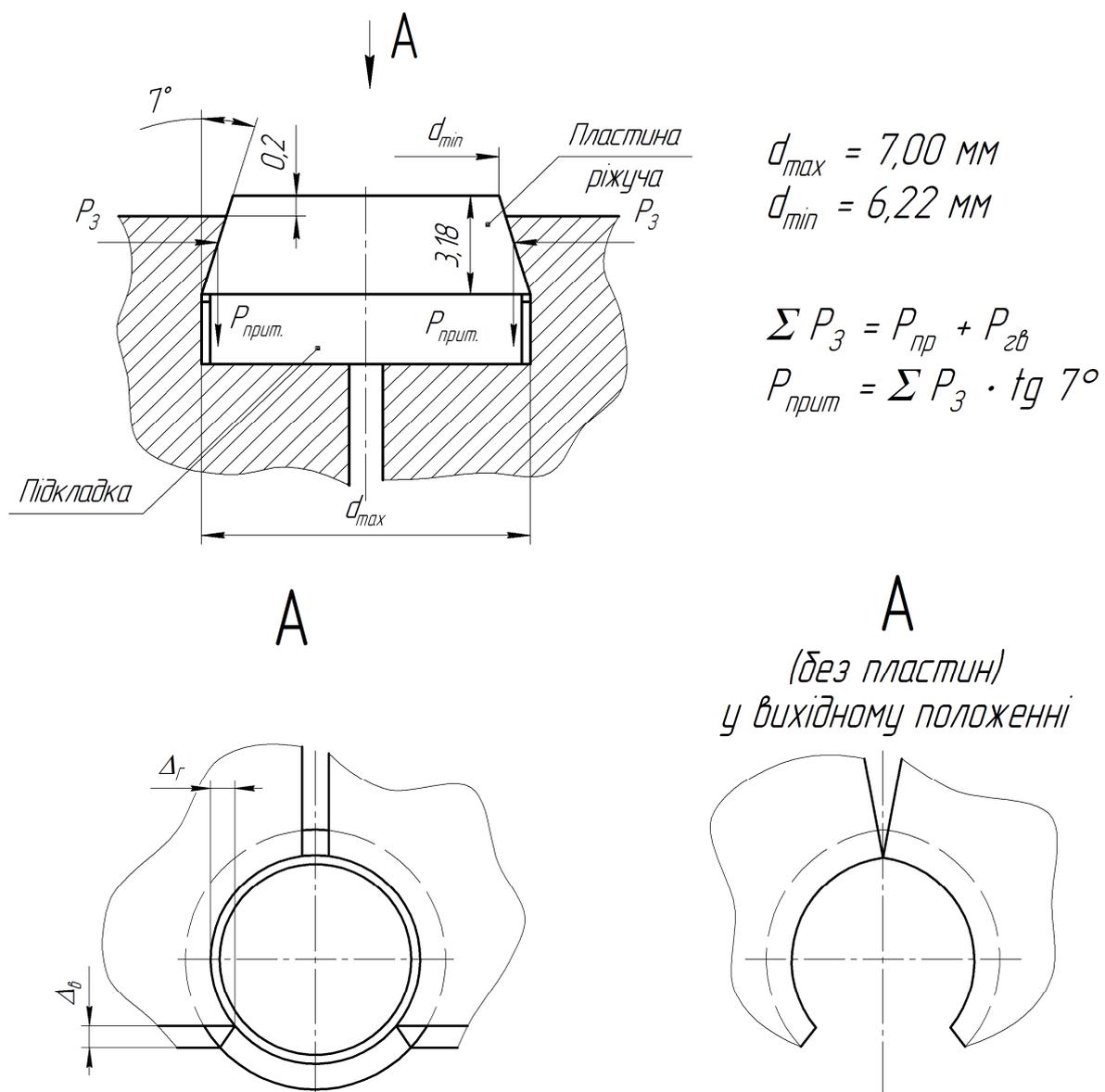


Рисунок 10 – Схема діючих сил на ріжучий елемент при закріпленні. Запобіжні конструктивні параметри.

Де $R_{пр}$. – пружне зусилля деформації пелюстків при монтажі пластинки; $R_{гв}$. – зусилля стискання пелюстків гвинтом; $R_{прит}$. – зусилля притискання пластинки до корпусу через прокладку.

Висновки

Наявність різноманітних конструктивних розробок в механічному закріпленні ріжучих пластинок з НТМ не є вичерпною. Існує нагальна потреба в оптимізації конструктивних рішень з метою забезпечення максимальної надійності, безпечності і економічної ефективності інструменту з НТМ.

Розроблена конструкція є певним кроком в цьому напрямку.

Крім безпечності конструкції отримана перевага також в тому, що відпадає необхідність у прихватах і прижимах, які погіршують сходження стружки.

Передбачається проведення всебічних досліджень як за методикою, наведеною в роботі [2], так і при екстремальних умовах.

Авторами розроблена технологія виготовлення, термообробки, складання та інструментального забезпечення ефективного виробництва розробленого способу закріплення.

Список літератури: 1. *Музыкант Я. А.* Зависимость работоспособности и конструкции инструмента от способа закрепления заготовки композита / Я. А. Музыкант // СТИН. – 1978. – № 3. – С. 22-24. 2. *Кочеровский Е. В.* Исследования узлов крепления режущих элементов из композита в расточной головке / Е. В. Кочеровский // СТИН. – 1998. – № 6. – С. 12-13. 3. Режущие инструменты, оснащенные сверхтвердыми и керамическими материалами, и их применение: [справочник] / В. Л. Жедь, Г. В. Боровский, Я. А. Музыкант, Г. М. Ипполитов. – М. : Машиностроение, 1987. – 320 с. 4. Інструмент з надтвердих матеріалів / під ред. М. В. Новикова. – Київ : ІНМ НАНУ, 2001. – 528 с.

А.Я. МОВШОВИЧ, д-р техн. наук,
С.С. ТИМОФЕЕВ, Харьков, Украина

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПРЕЦИЗИОННЫХ ПОР ТОПЛИВНОЙ АППАРАТУРЫ

В статті приведено результати досліджень вакуум-плазменного напилення для підвищення зносостійкості деталей паливної апаратури двигунів, дана оцінка технологічних методів підвищення надійності прецизійних пар, приведені їх переваги та недоліки, дані рекомендації по промислового використанню.

В статье приведены результаты исследований вакуум-плазменного напыления для повышения износостойкости деталей топливной аппаратуры двигателей, данная оценка технологических методов повышения надежности прецизионных пар, приведены их преимущества и недостатки, даны рекомендации по промышленному использованию.

In article results of researches vacuum-plasma deposition for increase of wear resistance of details fuel equipments of the engines are resulted, the given estimation of technological methods of increase of reliability of precision pairs, their advantages and lacks are resulted, recommendations on industrial use are given.

Введение. Надежность работы дизелей в значительной степени определяется работоспособностью деталей наиболее быстро изнашиваемых пар.

Несмотря на очистку топлива фильтрами, часть твердых частиц проходит вместе с топливом под высоким давлением с большей скоростью через малые зазоры, что приводит к износу прецизионные пары. В результате чего нарушается нормальная работа топливной аппаратуры и ухудшаются технико-эксплуатационные показатели двигателя [1].

Так как топливная аппаратура выполняет очень ответственные функции в обеспечении устойчивой работы двигателя. Прецизионные детали изготавливают с большой точностью, а в сопряжении допускаются зазоры не более 3 мкм. Поэтому даже незначительные износы рабочих поверхностей этих деталей нарушают нормальную работу топливного насоса и форсунок.

Анализ работы прецизионных деталей топливной аппаратуры двигателей показал, что их надежность и износостойкость в большей степени зависят от поверхностей твердости сопрягаемых деталей, а

повышение последней является одним из основных факторов повышения работоспособности конструкции. Основной причиной неостаточного ресурса этих деталей является абразивное изнашивание и задираобразование.

Методы повышения износостойкости. Значительный интерес для улучшения надежности и долговечности прецизионных пар топливной аппаратуры представляют методы нанесения износостойких покрытий: вакуумные, геоноплазменные, диффузионной металлизации, фторосодержащих поверхностно-активных веществ (ПАВ), детонационные и др.

По данным ряда исследований [1, 2, 3, 4] для повышения твердости деталей широкое распространение получила химико-термическая обработка, как более простой и дешевый метод повышения твердости до 60-62 HRC.

Основными недостатками данного метода являются: обезуглероживание поверхностного слоя, анизотропия свойств по сечению деталей, отпускная хрупкость и повышенная чувствительность к флокенообразованию.

В результате не обеспечивается необходимая износостойкость и сопротивляемость схватыванию прецизионных пар. Поэтому на практике приходится изыскивать другие более дорогие и трудоемкие методы обработки, обеспечивающие большую износостойкость деталей.

Другим методом, повышающим надежность и износостойкость плунжеров, клапанов и игл распылителей топливной аппаратуры является электрохимическое хромирование.

Нанесение покрытий проводилось при 50° электролита, плотности тока 50-100 А/дм в течение одного часа. При этом толщина покрытия составила 35-50 мкм. При осаждении хрома на шлифованную поверхность деталей структурные изменения в их материале не наблюдались, однако в слое хрома имелись макро- и микротрещины, являющиеся результатом сцепления хрома с основным материалом, вследствие образования в поверхностном слое покрытия растягивающих остаточных напряжений. Кроме этого установлена нестабильность микротвердости покрытия в пределах 750...1100 кгс/мм², что связано с остаточными напряжениями в покрытии. Несмотря на повышение износостойкости прецизионных деталей в 2-3 раза в результате применения электролитического хромирования, этот метод, в связи с указанными существенными недостатками, не получил распространения в серийном производстве. Для повышения износостойкости плунжерных пар более рационально, чем электролитическое хромирование, использовать химическое никелирование [3]. Этот метод обеспечивает повышение микротвердости

до 930 кгс/мм² при термообработке до 400°С. По сравнению с хромированием химическое никелирование обеспечивает меньший износ сопряженной детали пары (штулки, работающей совместно с никелированным плунжером). Кроме того слой покрытия ложится на деталь более равномерно (максимальная неровность слоя на плунжере 0,5 - 1,0 мкм, что упрощает последующую механическую обработку. Химическое никелирование нашло применение для восстановления изношенных плунжерных пар.

Другим способом, обеспечивающим высокую износостойкость прецизионных деталей топливной аппаратуры, является диффузионное борирование.

Его применение повышает износостойкость рабочих поверхностей в два раза по сравнению с гальваническим хромированием, в 3 раза выше азотирования и в 4 раза выше деталей из закаленной стали ШХ-15. Это достигается за счет очень высокой поверхностной твердости 2000 кгс/мм². Скорость диффузии, структуру и фазовый состав слоя определяют температурой, продолжительностью процесса и активностью борировочной среды. Борирование производят жидкофазным и газофазным способами, что эффективно для низколегированных сталей с содержанием углерода 0,3 - 0,5 проц. (сталь 40, 40Х, 38ХС, 65Г и др.) Толщина борированного слоя составляет 0,2 мм для углеродистых и 0,12 мм – для большинства легированных сталей. Следует, что необходима последующая обязательная термообработка относительно мягкой сердцевины деталей во избежание продавливания тонкого борированного слоя. В результате нагрева деталей в процессе борирования до 850-1100°С и последующей закалки неизбежны резкие охлаждения и как следствие, деформация деталей. Исходя из этого использование такого сложного и длительного процесса для прецизионных деталей пока ограничено.

Газовое газотирование позволяет повысить микротвердость прецизионных деталей до 750 кгс/мм². Также как и борирование этот метод является длительным процессом, связанным с нагревом до высоких температур и последующей механической обработкой.

Наибольший интерес из химико-термических методов обработки для промышленного применения на прецизионных деталях представляет диффузионная металлизация с образованием на поверхности изделия покрытия, основная составляющая которого карбиды или нитриды насыщаемого элемента (хрома или титана), в результате встречной диффузии с углеродом или азотом, находящимся в стали [2, 3]. Металлизация производилась в вакуумных печах с нагревом и выдержкой контейнеров с деталями при температуре 1150-1200°С в вакууме 1,33-1,133

Па в течении 5-6 час. Затем печи с контейнерами охлаждались в течении 2,5 часа до температуры окружающей среды. В результате диффузионного насыщения покрытия карбидом хрома размер детали изменился на 70-80 мкм при общей толщине насыщаемого и упрочненного слоя 100-120 мкм на сторону. Для повышения насыщающей способности диффузионного слоя подпятник, плунжер закаливался ТВЧ с температурой нагрева 840°C, выдержкой в 8-10 сек и охлаждением в индустриальном масле. После хромирования покрытие подвергали механической обработке шлифованием электрокорундовыми кругами и доводки притирами и пастами на основе синтетических алмазов. Как было установлено, покрытие карбидом хрома имело микротвердость 1300-2000 кгс/мм², что значительно выше, чем у серийных прецизионных деталей (800-1000 кгс/мм²), которые выполнялись из термообработанной стали ХВГ и азотированной стали 25Х5МА. Поскольку твердость покрытия значительно выше, чем у абразивных частиц в топливе (твердость кварца 1000 кгс/мм²), попадающих в зазоры плунжерных пар при трении, то их износ сокращается в 2 раза. При испытаниях топливного насоса с диффузионно-хромированной плунжерной парой не требовалось его регулировка (отсутствие регулировок в период эксплуатации дизеля является одним из главных резервов экономии топлива). Эффективным путем улучшения работы прецизионных деталей является применение тонких износостойких покрытий, получаемых способом конденсации вещества в вакууме с ионной бомбардировкой (метод КИБ). Вакуумно-плазменный метод КИП позволяет повысить твердость покрытия в несколько раз по сравнению с термообработкой. Этот метод заключается в испарении тугоплавких материалов электрической дугой в вакууме в присутствии реагирующих газов и последующей конденсации с ионной бомбардировкой паров материалов, либо их соединений с газами, которые образуются благодаря протеканию плазмохимических реакций [4, 5]. Процесс КИБ состоит из двух этапов – подготовки поверхности к нанесению покрытия, заключается в ее бомбардировке ускоренными ионами, что сопровождается нагревом этой поверхности для обеспечения качественной очистки и адгезионной прочности покрытия и затем последующей конденсации (нанесения покрытия), происходящей практически без дополнительного нагрева. Это связано с тем, что энергия ионов при бомбардировке существенно выше энергии при конденсации. В процессе нанесения покрытия в вакуумной камере устанавливались плунжера на определенном расстоянии от катода с распыляемым материалом. Для получения покрытия равномерного состава и толщины, плунжера приводились во вращение в плазменном потоке ионов,

движущихся от распыляемого материала к детали. В качестве распыляемых материалов для нанесения покрытия применялись тугоплавкие металлы- титан и молибден, а в качестве реактивного газа- азот. В результате чего на окончательно обработанный плунжер наносились покрытия нитрида титана или молибдена толщиной 3-5 мкм. После нанесения покрытия детали практически не подвергались механической обработке. Проведенные испытания на износ с использованием специального безмоторного стенда трения течении 12 часов серийных плунжерных пар из стали ШХ15 термообработанной до твердости 60-62 HRC и аналогичных плунжерных пар с покрытием плунжеров нитридом титана методом КИБ с твердостью примерно в 4 раза большей показали, что износ плунжера благодаря покрытию снизился в 1,85 раза. При натуральных испытаниях, ускоренных содержанием в топливе кварцевой пыли 0,01 г/л испытаниях в течении 12 часов было установлено, что покрытие плунжеров нитридом титана обеспечило снижение потери статической плотности в 1,08 раза, а динамической- в 1,18 раза. Результаты проведенных испытаний позволили рекомендовать технологию КИБ плунжеров для эксплуатационного применения.

Метод детонационно- газового напыления является наиболее перспективным как с точки зрения обеспечения износостойкости, так и технико-экономических показателей их применения [3].

Поскольку процесс детонационных покрытий является процессом импульсным, то, как правило, при формировании покрытий не происходит нагрева деталей свыше 250°C, следовательно, процесс исключает коробление детали, структурные и фазовые превращения ее материала, что не всегда обеспечивает другими методами.

Перед выше указанными методами детонационно-газовый метод насыщения покрытий обладает рядом преимуществ:

- прочность сцепления покрытий с изделием достигает от 180 до 360 Мпа, что на порядок выше, чем у покрытий, нанесенных другими методами, что позволяет применить их для упрочнения и восстановления деталей, работающих в экстремальных условиях при воздействии больших контактных и ударных нагрузок;

- толщина наносимого слоя лежит в пределах 0,2-0,6 мм;

- температура детали при напылении зависит от ее размера и не превышает 530°K, что соответствует низкому отпуску. Ввиду малой продолжительности процесса напыления, температурное воздействие незначительно;

- возможность плавного и устойчивого параметров процесса в широких диапазонах позволяет для каждого материала установить наиболее оптимальные режимы напыления;

- применение мелкодисперсных композиционных материалов для напыления позволяет формировать покрытие с шероховатостью от 10 до 20 мкм, что в некоторых случаях не требует дополнительной механической обработки;

- высокая энергия продуктов детонации, ускоряющая частицы, повышающая их температуру, позволяет формировать покрытия из тугоплавких материалов не только на металлических деталях с твердостью поверхности 60 HRC и выше, но и на не металлических материалах.

Более широкому внедрению данного метода в производство способствует возможность нанесения порошков различных составов (титана, керамики, пластмассы, композиционных порошков и др.) и получение покрытий с наперед заданными физико-механическими свойствами; относительно высокая производительность; возможность нанесения слоев различной толщины как на отдельные участки, так и по всей поверхности, экономия материальных средств за счет получения покрытий с минимальными припусками под последующую обработку; легкая управляемость процессом и возможность изменения энергетических параметров в зависимости от требований технологии напыления.

В последнее время для повышения антифрикционных свойств деталей пар трения начинает применять фторсодержащие поверхностно-активные вещества (ПАВ)-эпиламы. Это позволяет снизить их коэффициент трения, величину износа, увеличить ресурс и надежность работы этих деталей. Покрытие ПАВ наносится на поверхность в виде тонкой пленки, представляющей собой мономолекулярные соли, толщина которой составляет 40Å . В результате чего она не влияет на размеры и шероховатость поверхности деталей, поэтому данное покрытие не нуждается в механической обработке и может быть нанесено окончательного изготовления деталей. Основной особенностью фторсодержащих ПАВ является способность их прочно соединяться с поверхностями, образуя отдельные барьерные пленки с очень низким запасом поверхностной энергии. Это приводит к прочному удержанию масла и топлива, внесенных в узлы трения. В результате нанесения на твердые поверхности ПАВ их износ снижается в 2 и более раза в зависимости от характера работы узла [3, 5].

Технология нанесения ПАВ проста и может быть применена не посредственно в производственных условиях. Поверхность деталей обезжиривается в хладоне 113, ацетоне, бензине или других подобных

растворителях. После сушки детали погружают в эпиламирующий раствор на 5-7 мин. и затем высушивают их при температуре 20-150°C на воздухе. Более эффективным является обезжиривание и эпиламирование в указанных растворах при нагреве их до 50°C. В этом случае используется установка, имеющая емкости с обезжиривающими и эпиламирующими растворами и устройства для улавливания и конденсации выделяющихся из них паров.

Применение ПАВ на деталях начато сравнительно недавно. Так нанесение их перед сборкой на поверхность трения тяжело нагруженных шарниров, на основе проведенных испытаний, подтвердили целесообразность применения эпиламирования.

Выводы.

Подводя итоги рассмотрения особенностей работы прецизионных деталей топливной аппаратуры и применяемых для повышения их износостойкости технологических методов можно отметить следующее:

1. Основной причиной износа и нарушения работы прецизионных деталей топливной аппаратуры является схватывание в процессе приработки деталей и абразивный износ при взаимодействии в процессе работы деталей с твердыми частицами, попадающими с топливом.

2. Износостойкость технологическими методами может быть повышена путем нанесения покрытий с увеличением твердости поверхностей прецизионных деталей выше твердости абразивных частиц и гарантированным удержанием на поверхностях трения разделяющей их пленки топлива.

3. В качестве перспективных методов повышения надежности и износостойкости прецизионных пар топливной аппаратуры следует считать прогрессивные технологии нанесения покрытий диффузионной металлизацией, детонационно-газовым и вакуумно-плазменным (КИБ) методами в сочетании с фторосодержащими поверхностно-активными веществами (ПАВ).

Список литературы: 1. Антонов В.В. Износ прецизионных деталей и нарушение характеристики топливной аппаратуры. – М.: Машиностроение, 1992 – С.176. 2. Прогрессивные направления в изготовлении деталей топливной аппаратуры. – М.: ЦНИИТЭИтракторосельхозмаш, 1973. – С.54. 3. Долматов А.И., Мовшович А.Я., Буденный М.М. Перспективы развития высоких технологий в машиностроении // Мир техники и технологий. 2002, №3, с.8-11. 4. Аксаков А.Г. и др. Повышение износостойкости плунжерных пар поверхностным упрочнением нитридом титана // Двигателестроение, 1984, №3, с.33-34. 5. Комплексное решение вопроса увеличения ресурса и повышения надежности топливной аппаратуры дизелей // Двигателестроение, 2003, №1, с.58-60.

Ю.К. НОВОСЕЛОВ, д-р техн. наук, **С.М. БРАТАН**, д-р техн. наук,
Д.А. КАИНОВ, канд. техн. наук, Севастополь, Украина

АНАЛИТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ, ФОРМООБРАЗУЮЩЕГО ПОЛЯ И ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ШЛИФОВАНИИ

Запропоновані підходи для аналітичного моделювання параметрів формотворного поля і обробленої поверхні.

Предложены подходы для аналитического моделирования параметров формообразующего поля и обработанной поверхности.

Offered approach for the analytical design of the shape-generating field parameters and treated surface grinding.

Известно, что методы абразивно-алмазного шлифования являются широко распространенными способами финишной обработки деталей машин и приборов. В настоящее время при их проектировании недостаточно учитывается влияние ряда факторов, которые снижают стабильность показателей качества производимых изделий [1]. Технологические режимы для гарантирования показателей качества назначают исходя из неблагоприятных условий. Например, возобновление режущих свойств изношенного шлифовального круга производят значительно раньше, чем того требует его действительное состояние. Параметры операций определяют используя статистические детерминированные модели.

Приведенные в работах [2,3] стохастические модели предназначены для осуществления расчетов лишь для неизменных, установившихся условий шлифования (постоянных режимов резания, геометрии режущих кромок, числа зерен и т.д.). Они не позволяют учитывать изменение параметров качества внутри цикла обработки детали, вычислять параметры шероховатости по номинальным подачам, прогнозировать съем металла, износ круга, точность обработки и ряд других технико-экономических показателей. Для решения этих вопросов, нужен подход, основанный на учете не только стохастической, но и нестационарной сущности процесса.

Комплексное решение вышеуказанных задач является *целью настоящей работы*.

При движении режущих кромок, потоков частиц в пространстве обрабатываемой детали появляется качественно новый элемент – формообразующее поле (ФП) – совокупность поверхностей, описанных режущими кромками в пространстве обрабатываемой детали.

1. *Формообразующее поле* характеризуется целым комплексом геометрических параметров. При описании инструмента положение режущих кромок по глубине определяется относительно его наружной поверхности. При движении инструмента кромки оставляют следы, огибающая которых может рассматриваться как граница ФП. Такую границу удобно задавать в координатах обрабатываемой поверхности детали. Положение режущих поверхностей может задаваться как в координатах детали, так и относительно границы ФП. Например, для плоского шлифования, рис.1, вершина элемента ФП может задаться координатами x, y, z , причем

$$y = y_u + W,$$

где y_u – координата точки условной границы поля; W – расстояние от границы поля до вершины элемента.

Форма границы поля может существенно отличаться от формы инструмента. Для плоского шлифования (см. рис.1) образующие двигаются по трохоидам, а граница поля при отсутствии вибраций, деформаций, износа инструмента представляет собой плоскость, параллельную траектории движения центра инструмента.

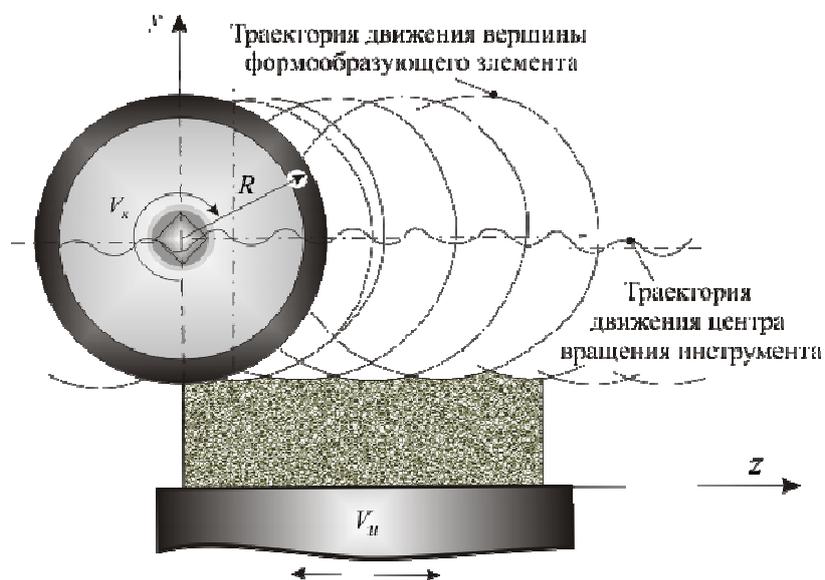


Рисунок 1 – Схема формирования ФП при обработке плоской поверхности вращающимся инструментом

С появлением вибраций граница поля может иметь достаточно сложную конфигурацию. При обработке плоских поверхностей

вращающимся инструментом и отсутствии самоперерезания волн [4] ординаты точек границы поля определяются соотношением:

$$y_u(z, t) = y(z, t_0) + \int_{t_0}^t V_{0y} d\tau + \Delta y_T(z, t) + \Delta y_{yu}(z, t) + \sum_i A_{0yu,i} \cos(t \cdot \omega_{0yu,i} + \psi_{0yu,i}) - R(\gamma, z, t). \quad (1)$$

где $y(z, t_0)$ – координата центра инструмента в момент времени t_0 ; V_{0y} – запланированная скорость движения центра инструмента по координате y ; $\Delta y_T(z, t), \Delta y_{yu}(z, t)$ – смещение условной наружной поверхности инструмента вследствие упругих и температурных деформаций технологической системы; $A_{0yu,i}, \omega_{0yu,i}, \psi_{0yu,i}$ – амплитуда, частота и фаза j гармоники вибрационных смещений центра инструмента.

При анализе базового участка ФП рассматриваются геометрия режущих поверхностей, их число и распределение. Здесь принято допущение, что абразивное зерно имеет бесконечно большую жесткость, режущая поверхность определяется совокупностью траекторий движения точек контуров формообразующих элементов, которые могут одновременно участвовать в нескольких вращательных и поступательных движениях. Результирующая скорость точек контура характеризуется векторной суммой этих скоростей.

В силу малости геометрических размеров зоны резания при шлифовании с приемлемой точностью можно полагать зерно перемещающимся параллельно самому себе в этой зоне и координаты точек режущей поверхности имеют вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} z = z_0 + \int_{t_0}^t [R(M) \cdot \omega_k \cdot \cos(\omega_k \cdot \tau + \gamma) + V_{0,z} + V_{0A,z} + V_{0yn,z} + V_{0T,z} + V_{3,z}] d\tau; \\ y = y_0 + \int_{t_0}^t [R(M) \cdot \omega_k \sin(\omega_k \cdot \tau + \gamma) + V_{0,y} + V_{0A,y} + V_{0yn,y} + V_{0T,y} + V_{3,y}] d\tau; \\ x = x_0 + \int_{t_0}^t [V_{0,x} + V_{0A,x} + V_{0yn,x} + V_{0T,x} + V_{3,x}] d\tau \end{array} \right. \quad (2)$$

где ω_k – угловая скорость инструмента; x_0, y_0, z_0 – координаты точки режущей кромки в момент времени t_0 ; γ – фаза угла поворота круга; $R(M)$ – радиус-вектор точки режущей кромки; $V_{0,x}, V_{0,y}, V_{0,z}$ – скорости движения оси инструмента по соответствующим координатам;

$V_{0A,x}, V_{0A,y}, V_{0A,z}, V_{0yn,x}, V_{0yn,y}, V_{0yn,z}, V_{0T,x}, V_{0T,y}, V_{0T,z}$ – скорости вибрационных и упругих и температурных перемещений оси инструмента, соответственно; V_{3x}, V_{3y}, V_{3z} – скорости изменения координат кромки относительно центра инструмента при его упругой деформации.

При исследовании законов распределения режущих поверхностей за основу взяты математические зависимости теории точности изделий, разработанные в [4].

По данным исследований [3] число элементов базового участка ФП $n_n(l_x, l_z)$ определяется по числу формообразующих элементов базового участка рабочей поверхности инструмента и кинематике и динамике процесса. Для шлифования

$$n_n(l_x, l_z) = n_3 l_x l_z \frac{V_k}{V_u} i \text{ при } l_x = l_z = 1; \quad n_n = n_3 \frac{V_k}{V_u}, \quad (3)$$

где i – число контактов участка поверхности с инструментом.

Распределения элементов на базовом участке формообразующего поля по координатным осям x и z отличаются от равномерного при наличии отклонений в скорости инструмента и детали. Принимая во внимание, что плотность вероятностей $f_{\eta z}(z)$ расстояний η_z от начала координат до

$$f_{\eta z}(z) = \frac{1}{n_n(l_x, l_z)} \cdot \frac{dn_n(l_x, l_z)}{dz},$$

вершин элементов по оси z имеет вид $f_{\eta z}(z)$, а число элементов базового участка поля при изменении скоростей инструмента $V_k(\tau)$ и детали $V_u(\tau)$ выражается интегралом Стильеса

$$n_n(l_x, l_z) = n_3 l_x \int_0^{l_z} \frac{V_k(\tau)}{V_u(\tau)} dz(\tau),$$

получим

$$f_{\eta z}(z) = \frac{V_k(\tau)}{V_u(\tau) \int_0^{l_z} \frac{V_k(\tau)}{V_u(\tau)} dz}.$$

Если, например, $V_k = const$, а скорость детали изменяется пропорционально x , плотность вероятностей расстояний от начала координат до вершин элементов поля будет уменьшаться с увеличением x , рис.2.

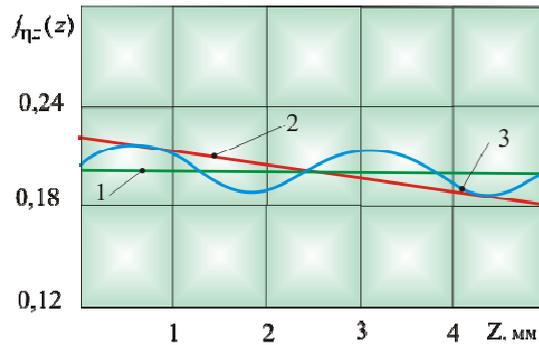


Рисунок 2 – Плотности распределений элементов воспроизводящего поля в направлении вектора скорости резания при: 1 – постоянстве V_k и V_u ; 2 – снижении V_k ; 3 – изменении V_k по синусоидальному закону

В свою очередь, изменение плотности вероятности приводит к изменению и других параметров ФП.

Как и для рассмотренных ранее факторов, распределение элементов базового участка формообразующего поля по глубине, зависит от соответствующего распределения элементов рабочей поверхности инструмента, кинематики и динамики движений. Так в системе отсчета обрабатываемой детали, смещение режущих контуров определяется изменением координат поверхности инструмента y_u . Их расстояния до уровня инструмента, сопрягаемого с фиксированным уровнем поля, вычисляется по зависимости:

$$u(t) = y - y_u(t_0) + \int_{t_0}^t V_y d\tau.$$

Мгновенная плотность вероятностей ординат вершин поля $f_{\eta y(t)}(y)$ определяется по плотности вероятностей расстояний от наружной поверхности инструмента до вершин режущих кромок

$$f_{\eta y(t)}(y) = f_{\xi u}(y - y_u(t_0) + \int_{t_0}^t V_y d\tau),$$

а результирующий закон $f_{\eta y}(y)$ – усреднением плотностей мгновенных распределений

$$f_{\eta y}(y) = \frac{1}{t_1 - t_0} \cdot \int_{t_0}^{t_1} f_{\xi u}[y - y_u(t_0) + \int_0^t V_y d\tau] dt. \quad (5)$$

При перемещении с подачей S_y

$$f_{\eta y}(y) = \frac{1}{n_{31} + n_{32} + \dots + n_{3m}} \left[n_{31} f_{\xi u}(y - y_u + S_y) + n_{32} f_{\xi u}(y - y_u + S_{y1} + S_{y2}) + \dots + n_{3m} f_{\xi u}(y - y_u + \sum_{i=1}^m S_{yi}) \right], \quad (6)$$

где $n_{31} + n_{32} + \dots + n_{3m}$ и $S_{y1} + S_{y2} + \dots + S_{ym}$ – соответственно числа зерен на единице рабочей поверхности инструмента и подачи при выполнении 1-го, 2-го, ..., m-го проходов.

При многопроходной обработке, когда положение инструмента в направлении оси y , изменяется периодически, плотность вероятностей расстояний до вершин элементов поля по глубине может иметь несколько максимумов, рис.3.

Расчеты выполнены для трех последовательных проходов при $S_{y1} = S_{y2} = S_{y3} = \Delta y$

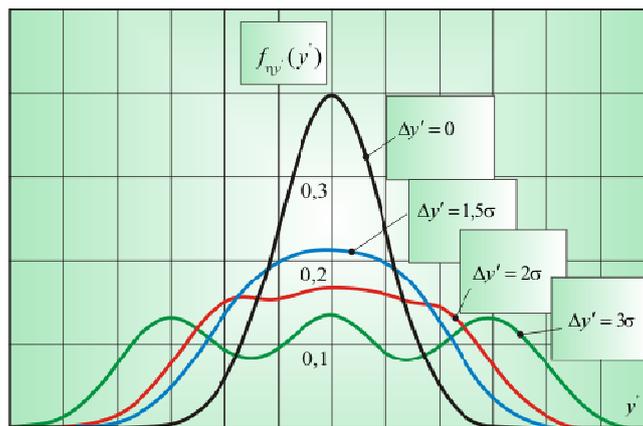


Рисунок 3 – Плотности вероятностей распределения режущих поверхностей по глубине формообразующего поля при дискретном сближении инструмента и детали

2. *Граничная область материал – среда и ее описание.* Для большинства процессов обрабатываемая поверхность не может быть представлена как простое геометрическое копирование формообразующего поля, так как взаимодействие режущих кромок и материала сопровождается комплексом сложных физических и химических явлений. В то же время трудно назвать процессы, для которых бы наблюдалось абсолютное несовпадение обработанной поверхности и поля. Многочисленные экспериментальные данные показывают, что, как правило, существует тесная корреляционная, а в ряде случаев и

функциональная связь между ними как по макро-, так и микрогеометрическим параметрам.

При описании базового участка за начало отсчета целесообразно принять поверхность впадин (в сечении – линию впадин), координаты которой определяются по координатам условной границы поля, величине упругих и температурных деформаций материала детали.

Описание геометрических параметров обработанной поверхности, как и формообразующего поля, можно выполнить двумя методами: а) заданием формы, геометрических размеров, законов распределения единичных рисок, кратеров, сколов; б) заданием поверхности функционалами случайного поля.

Для каждой произвольной точки $M(x, y, z)$ в граничной области материал – среда (рис. 4а) в процессе формообразования можно говорить о двух событиях: событии, заключающемся в том, что материал в этой точке будет удален, и противоположном событии (материал в точке останется не удаленным). Эти события образуют полную группу и сумма их вероятностей равна единице. Конкретные значения вероятностей в общем случае зависят от положения точки в граничной области по всем трем координатам. Например, если начало координат для поверхности с регулярным микропрофилем совместить с вершиной одного из выступов шероховатости, то при постоянстве формы единичных рисок, их глубины и равенстве расстояний между рисками l_{mp} вероятность удаления металла будет функционально зависеть от координаты x (см. рис. 4а). При

координатах точки $l_{mp} - \frac{b_M}{2} \leq x \leq l_{mp} + \frac{b_M}{2}$, вероятность удаления металла равна нулю так как точка лежит в пределах выступа шероховатости поверхности, и вероятность удаления металла равна единице, если точка лежит за пределами указанного интервала. График зависимости вероятности удаления металла представляется кусочно-непрерывной функцией со значениями нуль и единица (рис. 4б, линия 1).

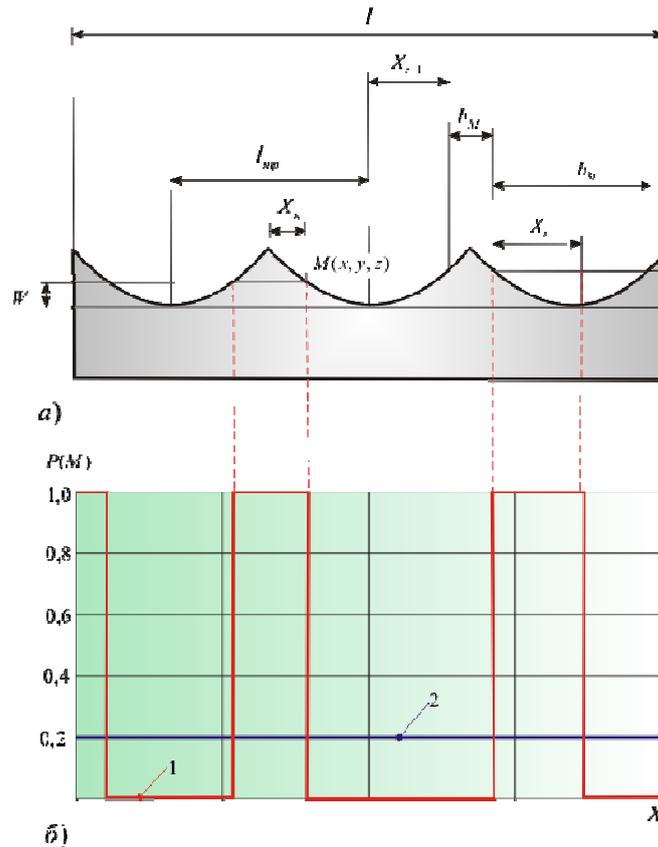


Рисунок 4 – К анализу граничной области: а) схема поверхности материал – среда; б) вероятность удаления материала при жестком (кривая 1) и нежестком (кривая 2) закреплении профиля относительно начала координат

Если профиль обработанной поверхности стационарен и относительно начала координат жестко не закреплен, то вероятность удаления металла представляется прямой, параллельной оси x , рис. 4б – линия 2, а величина вероятности геометрически определяется отношением суммы длин отрезков b_{Mi} , заполненных металлом, к длине сечения l

$$P(M) = 1 - P(\bar{M}) = 1 - \lim_{l \rightarrow \infty} \frac{\sum_i b_{Mi}}{l}. \quad (8)$$

Поскольку $\sum_i b_{Mi}$ при $l \rightarrow \infty$ стремится к $l\lambda M[b_M]$, уравнение (7) может быть записано в следующем виде

$$P(M) = 1 - \lambda M[b_M], \quad (9)$$

где λ – математическое ожидание числа выступов на единицу длины сечения.

При наличии отклонений формы на поверхности, величина вероятности удаления материала будет определяться не только выбором координаты y , но и координат x и z . Для каждого из возможных сочетаний x и z может быть вычислена ордината граничной области, для которой вероятность удаления материала принимает заданное значение β_M . Совокупность таких точек образует в пространстве поверхность, а в сечении – линию равной вероятности удаления материала. Изменяя β_M , получим семейство поверхностей (линий) равной вероятности, рис. 5, а задавшись приемлемыми значениями максимального и минимального уровней, например, $\beta_{M \min} = 0,00135$ и $\beta_{M \max} = 0,99885$ – две поверхности, ограничивающие рассматриваемую область материал – среда сверху и снизу. По изменению положения уровней равной вероятности можно судить о пространственных отклонениях обрабатываемой поверхности и об изменении величины слоя, в котором распределена шероховатость (рис.5).

Вероятности удаления и вероятность неудаления материала в большей мере отражают динамику процесса формирования поверхности по сравнению с относительной опорной длиной профиля, которая вычисляется только для конкретной реализации номинального профиля.

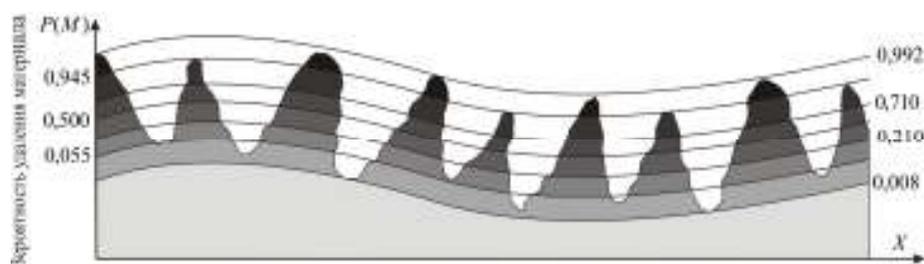


Рисунок 5– Уровни равной вероятности удаления материала на обработанной поверхности

О вероятности удаления материала и ее изменении можно говорить для любой точки пространства, в котором задана обрабатываемая поверхность. Математическое ожидание относительной опорной длины профиля непосредственно определяется по вероятности неудаления материала

$$t_p = \frac{1}{l} \int_0^l P(\bar{M}) dx \quad (10)$$

и численно равна ей, если $P(\bar{M})$ не зависит от x .

Функционал вероятности удаления материала относится к функционалам, описывающим обрабатываемую поверхность как случайное поле. Для поверхностей без жесткого закрепления профиля относительно начала координат он совпадает с функцией плотности распределения ординаты профиля детали $F_w(W)$.

В действительности функция распределения $F_w(W)$ вычисляется как:

$$F_w(W) = P(W < w).$$

где w – фиксированное значение случайной величины W .

Так как вероятность $P(W < w)$ любого произвольного профиля поверхности (см. рис. 6) равна вероятности попадания точки в интервалы отрезков АБ, СД, ... и т.д., для которых $W < w$, то

$$P(W < w) = \lim_{l \rightarrow \infty} \frac{l - \sum b_{Mi}}{l} = P(M).$$

При полном геометрическом копировании на детали профиля воспроизводящего поля

$$P(M) = F_w(W). \quad (11)$$

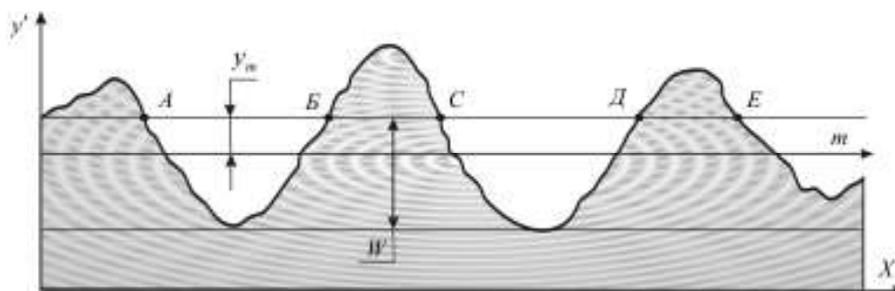


Рисунок 6 – Схема к вычислению функции распределения ординат профиля обработанной поверхности

Таким образом, при формировании поверхности в условиях преобладания одного из процессов вероятность удаления материала и функция плотности распределения ординат профиля определяются по параметрам воспроизводящего поля.

3. *Вычисление вероятности удаления материала при совмещении процессов формообразования.* Как отмечалось, новая поверхность может возникать как результат совместного воздействия на материал детали нескольких процессов. Например, точение хрупких материалов может сопровождаться появлением сколов, кратеров. Обработка пластичных материалов - образованием волн пластической деформации и т.д. Расчет вероятности в этих случаях основан на изучении каждого из процессов с последующим их совмещением. При этом рассматриваемые процессы могут быть зависимыми и независимыми. Так, при электрохимическом шлифовании протекают три процесса: механического разрушения, электрохимического растворения и электроэрозионного разрушения материала [5]. Все они зависимы: интенсивность электрохимического растворения неодинакова для впадин и вершин неровностей, а возникновение искрового разряда наиболее вероятно между связкой и одним из выступов шероховатости поверхности. К независимым процессам могут быть отнесены профили, возникающие при многооперационной обработке, например, при точении и последующем шлифовании, когда съём материала на заключительной операции лежит в пределах исходной шероховатости.

Вероятность удаления материала при одновременном протекании нескольких процессов формообразования вычисляется по уравнениям схемы Байеса. Например, при нарезании резьбы со смещением инструмента вдоль одной из образующих, рис. 7а, для двух зависимых профилей, вероятность удаления материала определяется вероятностью события, заключающегося в том, что произвольно выбранная точка будет находиться в пределах профиля инструмента либо на втором; либо на первом, либо одновременно при выполнении первого и второго проходов.

$$P(M_1 + M_2) = P(M_1) + P(M_2) - P(M_1M_2), \quad (12)$$

где $P(M_1M_2)$ – вероятность выполнения совместного события.

Для событий независимых

$$P(M_1 + M_2) = 1 - P(\bar{M}_1)P(\bar{M}_2). \quad (13)$$

Для двух процессов, когда один из них приводит к увеличению доли материала на рассматриваемом уровне, целесообразно вычислять вероятность неудаления материала:

$$\bar{P}[(\bar{M}) + \bar{M}^*] = P(\bar{M}) + P(\bar{M}^*) - P(\bar{M}\bar{M}^*), \quad (14)$$