

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

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

1'2018

ВИСОКІ ТЕХНОЛОГІЇ В
МАШИНОБУДУВАННІ

HIGH TECHNOLOGIES IN MACHINE
ENGINEERING

Збірник наукових праць

Printed scientific works

Харків НТУ «ХНІ» - 2018 - Kharkiv NTU «KhPI»

УДК 621.91
ББК 34.63
В53

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

Друкується за рішенням Вченої Ради НТУ «ХПІ»,
(протокол № 6 від 06.07.2018 р.)

Редакційна колегія:

*І. М. Пижов, д.т.н. (відповідальний редактор),
Пупань Л. І. (зам. відповідального редактора),
Верезуб М. В., д.т.н., Весткемпер Э., д.т.н., Доброскок В. Л., д.т.н.,
Залога В. О., д.т.н., Зубар В. П., проф., Пермяков О. А., д.т.н.,
Ролдугін В. І., д.е.н., Турманідзе Р. С., д.т.н., Узунян М. Д., д.т.н.,
Фадєєв В. А., д.т.н., Федорович В. О., д.т.н., Шнайдер Д., д.т.н.,
Руднєв О.В., к.т.н. (в.о. відповідального секретаря)*

В збірнику представлені наукові праці, які присвячені вирішенню проблем в області високих технологій машинобудування. Розглянуті питання обробки матеріалів різанням, верстатів з ЧПК, сучасного інструментального забезпечення, використання 3D моделювання для конструювання інструментальних та робочих поверхонь, контролю поверхонь, які отримані за допомогою нанотехнологій, та ін. Для фахівців в області машинобудування, науково-технічних працівників і студентів.

В53 Високі технології в машинобудуванні: зб. наук, праць / Під заг. ред. проф. О.М. Шелкового, редкол.: проф. І.М. Пижов (голова) та ін. – Харків, НТУ "ХПІ", 2018. - Вип. 1 (28). - 216 с.

В сборнике представлены научные труды, которые посвящены решению проблем в области высоких технологий машиностроения. Рассматриваются вопросы обработки материалов резанием, станков с ЧПУ, современного инструментального оснащения, применения 3D моделирования для конструирования инструментальных и рабочих поверхностей, контроля поверхностей, полученных с помощью нанотехнологий, и др. Для специалистов в области машиностроения, научно-технических работников и студентов.

Матеріали відтворено з авторських оригіналів

ББК 34.63
УДК 621.91
©НТУ «ХПІ», 2018

УДК 621.9

С.А. Клименко, д-р техн. наук, Киев, Украина

СТАРАТЕЛЬ И СВЕТИТЕЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ НАСЛЕДСТВЕННОСТИ

**(к 90-летию со дня рождения выдающегося российского и украинского
ученого-машиностроителя, создателя научно-практических основ
технологического обеспечения качества и эксплуатационных свойств
деталей машин, фундатора Ассоциации технологов-машиностроителей
Украины Эдуарда Вячеславовича Рыжова)**



8 ноября 2018 г. исполняется 90 лет со дня рождения профессора, доктора технических наук, Заслуженного деятеля науки и техники Российской Федерации Эдуарда Вячеславовича Рыжова.

Родился Эдуард Вячеславович в г. Брянске.

В 1944 г. он был принят на подготовительное отделение Бежицкого машиностроительного института, позднее переименованного в Брянский институт транспортного машиностроения (БИТМ, ныне Брянский государственный технический университет). В 1950 г. с отличием окончил институт, получив звание инженера-механика по специальности «Технология

машиностроения» и был направлен на Ленинградский металлический завод, где работал мастером механосборочного цеха, потом старшим инженером технологической лаборатории завода.

Научная деятельность Э.В. Рыжова началась в декабре 1951 г. с поступления в аспирантуру при кафедре «Технология машиностроения» Ленинградского политехнического института, где в 1954 г. под руководством проф., д.т.н. А.П. Соколовского он досрочно защитил кандидатскую диссертацию.

С 1954 г. по 1958 г. Э.В. Рыжов работал доцентом сельскохозяйственного института в г. Волгограде. С 1958 г. продолжил научно-педагогическую деятельность в БИТМе в должности старшего научного сотрудника, доцента, заведующего кафедрой «Технология машиностроения».

В 1967 г. Эдуард Вячеславович защитил докторскую диссертацию в Московском станкоинструментальном институте.

В 1970 г. он был назначен проректором по научной работе, а затем, до 1979 г., являлся ректором БИТМа, продолжая активно участвовать в научно-исследовательской работе, выполняемой по заданиям Волгоградского тракторного завода, Коломенского завода тяжелых станков, Горьковского завода фрезерных станков, Московского завода шлифовальных станков, Брянского завода ирригационных машин и других машиностроительных заводов г. Брянска, научно-исследовательских институтов различных отраслей промышленности. В те же годы были налажены тесные контакты и обмен научно-педагогическим опытом с ВУЗами Чехословакии, ГДР, Венгрии, Болгарии, Великобритании.

В 1976 г. Эдуарду Вячеславовичу присвоено почетное звание «Заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации».

С именем Эдуарда Вячеславовича Рыжова связано создание и развитие Брянской научной технологической школы. В своем развитии более чем за 40 лет она прошла путь от решения частных вопросов изучения шероховатости, контактной жесткости, износостойкости и обработки поверхностей различными методами до комплексного решения проблем повышения качества и обеспечения эксплуатационных свойств деталей машин.

В Институте сверхтвердых материалов (ИСМ) АН УССР профессор Э.В. Рыжов работал заместителем директора по научной работе (1979-1986 гг.) и до последнего дня жизни (20 ноября 1997 г.) возглавлял отдел "Технологическое управление качеством обработки поверхностей".

В 1970 г. он был назначен проректором по научной работе, а затем, до 1979 г., являлся ректором БИТМа, продолжая активно участвовать в научно-исследовательской работе, выполняемой по заданиям Волгоградского тракторного завода, Коломенского завода тяжелых станков, Горьковского завода фрезерных станков, Московского завода шлифовальных станков, Брянского завода ирригационных машин и других машиностроительных заводов г. Брянска, научно-исследовательских институтов различных отраслей промышленности. В те же годы были налажены тесные контакты и обмен научно-педагогическим опытом с ВУЗами Чехословакии, ГДР, Венгрии, Болгарии, Великобритании.

В 1976 г. Эдуарду Вячеславовичу присвоено почетное звание «Заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации».

С именем Эдуарда Вячеславовича Рыжова связано создание и развитие Брянской научной технологической школы. В своем развитии более чем за 40 лет она прошла путь от решения частных вопросов изучения шероховатости, контактной жесткости, износостойкости и обработки поверхностей различными методами до комплексного решения проблем повышения качества и обеспечения эксплуатационных свойств деталей машин.

В Институте сверхтвердых материалов (ИСМ) АН УССР профессор Э.В. Рыжов работал заместителем директора по научной работе (1979-1986 гг.) и

до последнего дня жизни (20 ноября 1997 г.) возглавлял отдел "Технологическое управление качеством обработки поверхностей".

В ИСМ он развивал направление работ по технологическому управлению качеством и эксплуатационными свойствами поверхностей. Основываясь на исследованиях в области механики контактного взаимодействия твердых тел, основных положениях теории упругости и эластичности, в этом направлении были разработаны математические модели для оценки поверхностной прочности металлов в условиях упругого, пластического и упругопластического контакта при статических и динамических нагрузках. Эти результаты получили надежное экспериментальное подтверждение и сегодня широко используются в работах отечественных и зарубежных специалистов и исследователей при анализе контактной прочности и жесткости.

Разработанные теоретические подходы ознаменовали новый этап в развитии расчетов контактного взаимодействия деталей, позволившем фактически впервые в мировой практике учитывать на стадии проектирования машин влияние технологии изготовления на их важнейшие эксплуатационные показатели.

Эти результаты оказали решающее влияние на прикладные работы по оптимизации технологических процессов физико-механической обработки деталей, выполненные под научным руководством Э.В. Рыжова. Значительно расширен диапазон рационального применения традиционных методов обработки, разработаны и усовершенствованы эффективные комбинированные методы физико-механической обработки – тонкая плазменно-механическая обработка, электромеханическая с одновременным легированием поверхности, магнитно-абразивная, лазерно-механическая, алмазно-электроэрозионное шлифование и др. Разработаны высокоэффективные технологии обработки деталей с покрытиями высокой твердости при использовании инструментов из сверхтвердых материалов.

За исследования по обработке наплавленных материалов и внедрение их результатов в промышленность Э.В. Рыжову в составе коллектива авторов ИЭС им. Е.О. Патона АН УССР и ИСМ АН УССР в 1988 г. присуждена премия АН УССР им. Е.О. Патона.

Э.В. Рыжовым заложен фундамент успешного функционирования в ИСМ научной школы по качеству обработки поверхности и управлению ее эксплуатационными свойствами, в результате чего на практике было достигнуто повышение производительности обработки, качества, надежности и долговечности выпускаемой продукции в различных отраслях машиностроения – станков, турбин, дизелей, технологической оснастки, металлургического оборудования, инструментов, деталей приборостроения.

Эдуард Вячеславович был инициатором создания и первым президентом

Ассоциации технологов-машиностроителей Украины – всеукраинской общественной организации, объединяющей специалистов промышленных предприятий, научно-исследовательских отраслевых и академических институтов, ВУЗов; был одним из организаторов Академии инженерных наук Украины.

В 1995 г. он был избран академиком Нью-Йоркской академии наук США.

Долгое время Э.В. Рыжов являлся заместителем главного редактора журнала "Сверхтвердые материалы", был организатором и участником многочисленных Международных научно-технических конференций.

Перу Эдуарда Вячеславовича принадлежат более 500 научных трудов, в том числе 23 монографии и справочника, изданных в Украине, странах СНГ, США, КНР, Японии, Франции, Индии, Югославии, Великобритании, ГДР, Венгрии, Чехословакии, Польше, Болгарии.

Профессор Э.В. Рыжов оставил после себя авторитетную научную школу, многочисленных учеников – более 60 кандидатов и 10 докторов технических наук, успешно развивающих направление технологического обеспечения качества и эксплуатационных свойств деталей машин. Для них Эдуард Вячеславович Рыжов был не только учителем, но и примером огромной работоспособности, а также высокой требовательности к себе, творческого отношения к науке, настоящим профессионалом, ученым, образцом порядочного и принципиального человека.

Основные научные труды:

1. Рыжов, Э.В. Основы расчета стыковых поверхностей деталей машин на контактную жёсткость / Э.В. Рыжов. – М.: Машгиз, 1962. – 143 с.

2. Рыжов, Э.В. Контактная жесткость деталей машин / Э.В. Рыжов. – М.: Машиностроение, 1966. – 195 с.

3. Рыжов, Э.В. Раскатывание резьб / Э.В. Рыжов, О.С. Андрейчиков, А.Е. Стехков. – М.: Машиностроение, 1974. – 122 с.

4. Ящерицын, П.И. Технологическая наследственность в машиностроении / П.И. Ящерицын, Э.В. Рыжов, В.И. Аверченков. – Минск: Наука и техника, 1977. – 256 с.

5. Рыжов, Э.В. Качество поверхности при алмазно-абразивной обработке / Э.В. Рыжов, А.А. Сагарда, В.Б. Ильицкий, И.Х. Чеповецкий. – К.: Наук. думка, 1978. – 244 с.

6. Рыжов, Э.В. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин / Э.В. Рыжов, А.Г. Суслов, В.П. Федоров. – М.: Машиностроение, 1979. – 176 с.

7. Демкин, Н.Б. Качество поверхности и контакт деталей машин / Н.Б. Демкин, Э.В. Рыжов. – М.: Машиностроение, 1981. – 243 с.

8. Рыжов, Э.В.. Контактное взаимодействие твердых тел при статических и динамических нагрузках / Э.В. Рыжов, Ю.В. Колесников, А.Г. Суслов. –

Киев: Наук. думка, 1982. – 172 с.

9. Рыжов, Э.В. Технологические методы повышения износостойкости деталей машин / Э.В. Рыжов. – Киев: Наук. думка, 1984. – 272 с.

10. Рыжов, Э.В. Оптимизация технологических процессов механической обработки / Э.В. Рыжов, В.И. Аверченков. – Киев: Наук. думка, 1989. – 192 с.

11. Рыжов, Э.В. Математические методы в технологических исследованиях / Э.В. Рыжов, О.А. Горленко. – Киев: Наук. думка, 1990. – 184 с.

12. Рыжов, Э.В. Технологическое обеспечение качества деталей с покрытиями / Э.В. Рыжов, С.А. Клименко, О.Г. Гуцаленко. – К.: Наук. думка, 1994. – 181 с.

Стаття біографічно коротко висвітлює життя і професійну діяльність видатного російського і українського вченого-машинобудівника, організатора освіти і науки, професора, доктора технічних наук, ректора Брянського інституту транспортного машинобудування в Російській федерації та заступника з наукової роботи директора Інституту надтвердих матеріалів в Україні, академіка і віце-президента Академії інженерних наук України, першого президента Асоціації технологів-машинобудівників України, Заслуженого діяча науки і техніки Російської Федерації і лауреата Премії АН УРСР ім. Є.О. Патона Рижова Едуарда Вячеславовича.

Ключові слова: машинобудування, технологічна спадковість, управління якістю обробки, продуктивність, надійність, довговічність, Рижов Едуард Вячеславович.

Статья биографично кратко освещает жизнь и профессиональную деятельность выдающегося российского и украинского ученого-машиностроителя, организатора образования и науки, профессора, доктора технических наук, ректора Брянского института транспортного машиностроения в Российской Федерации и заместителя по научной работе директора Института сверхтвердых материалов в Украине, академика и вице-президента Академии инженерных наук Украины, первого президента Ассоциации технологов-машиностроителей Украины, Заслуженного деятеля науки и техники Российской Федерации и лауреата Премии АН УССР им. Е.О. Патона Рыжова Эдуарда Вячеславовича.

Ключевые слова: машиностроение, технологическая наследственность, управление качеством обработки, производительность, надежность, долговечность, Рыжов Эдуард Вячеславович.

The article biographically briefly highlights the life and professional activities of the outstanding Russian and Ukrainian engineering scientist, the organizer of education and science, the professor, the Doctor of Technical Sciences, the Rector of the Bryansk Institute of Transport Engineering in the Russian Federation and the Deputy on scientific work of the Director for the Institute of Superhard Materials in Ukraine, -president of the Academy of Engineering Sciences of Ukraine, the first president of the Association of Technologists -Manufacturers of Ukraine, Honored Worker of Science and technique of the Russian Federation and the laureate of the E.O. ПАТОН Prize of the Academy of Sciences of the Ukrainian SSR Ryzhov Eduard Vyacheslavovich.

Keywords: mechanical engineering, technological heredity, quality management of processing, productivity, reliability, durability, Ryzhov Eduard Vyacheslavovich.

Надійшла до редколегії 13.08.2018

УДК 621.3.095.22

Б.А. Алексенко, аспірант, С.С. Добротворський, д-р техн. наук,
Л.Г. Добровольська, канд. техн.наук, Харків, Україна

ВПЛИВ ВНУТРІШНЬОГО ДИСЕКТОРА НА РІВНОМІРНІСТЬ РОЗПОДІЛУ ЕНЕРГІЇ НВЧ ВИПРОМІНЮВАННЯ В ПРОЦЕСІ РЕГЕНЕРАЦІЇ АДСОРБЕНТІВ В ПРОМИСЛОВИХ ОСУШУВАЧАХ

Розглянуто структуру хвильоводів, яка може використовуватися в адсорбційних колонах осушувачів стисненого повітря з метою регенерації молекулярних сит за допомогою використання мікрохвильової енергії в процесі десорбції. Представлений теоретичний експеримент, який відкриває перспективи подальших практичних досліджень впливу НВЧ випромінювання на процес десорбції молекулярного сита в умовах роботи адсорбційної колони як частини адсорбційного осушувача та створення ефективного інноваційного зразку промислового обладнання.

Ключові слова: адсорбційна колона, СВЧ-випромінювання, хвильоводная структура

Рассмотрена волноводная структура, которая может быть использована в адсорбционных колоннах осушителя сжатого воздуха для регенерации молекулярного сита с использованием микроволновой энергии в процессе десорбции. Представлен теоретический эксперимент, который открывает перспективу дальнейших практических исследований влияния СВЧ-излучения на процесс десорбции молекулярного сита в условиях работы адсорбционной колонны в составе адсорбционного сушилки и создания эффективного инновационного образца промышленного оборудования.

Ключевые слова: адсорбционная колонна, СВЧ-излучение, волноводная структура

Waveguide structure which can be used in the adsorption columns of compressed air dehumidifiers for the purpose of molecular sieve regeneration by using microwave energy in the process of desorption are considered. Presented theoretical experiment which opens the prospect for further practical studies of the effect of microwave radiation on the process of molecular sieve desorption under conditions of the adsorption column operation as part of the adsorption dryer, and the creation of an effective innovative sample of industrial equipment.

Key words: adsorption column, microwave radiation, waveguide structure

Вступ. Математичне моделювання фізичних процесів є актуальною сферою наукових знань, яка швидко розвивається. Сучасні програмні продукти можуть бути використані для отримання S-параметрів [1], створення моделей SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) та тривимірного моделювання електромагнітного поля методом кінцевих елементів, що значно полегшує та прискорює розробку нового обладнання, яке використовує мікрохвильову енергію (НВЧ випромінювання). У наданій роботі розглянуто проблему використання мікрохвильової енергії для регенерації адсорбенту [2-4] у промислових осушувачах стисненого повітря.

Сучасні тенденції розвитку технологічних процесів термічної обробки спрямовані на використання енергії НВЧ-випромінювання як джерела тепла. Використання мікрохвильового випромінювання в процесі термічної обробки

матеріалів дозволяє поліпшити характеристики матеріалів, які обробляються, внаслідок обсягу і однорідності нагріву. Також стає можливо безпосередньо поліпшити показники тих самих технологічних процесів, які, завдяки використанню мікрохвильової енергії, характеризуються екологічністю, відсутністю теплової інерції та високою ефективністю.

Огляд літератури. Головне завдання розробників обладнання, що використовує енергію НВЧ [5] – це підвищити ефективність мікрохвильового нагрівача шляхом поліпшення рівномірності розподілу мікрохвильової енергії всередині нагрівальної камери, а також підвищити ефективність та стабільність процесу термічної обробки матеріалів. Відоме устаткування для мікрохвильової сушки діелектричних матеріалів [6], в якому регулювання потужності дії енергії НВЧ-випромінювання здійснюється шляхом чергового віддалення та наближення обробленого матеріалу до зони найвищої інтенсивності випромінювання мікрохвильової енергії; однак, суттєвим недоліком цієї конструкції є невеликий об'єм висушеного продукту в камері та технічна складність впровадження технології в конструкції адсорбційного осушувача. В інших конструкціях [7], генератори мікрохвильових нагрівачів з численною кількістю передавальних антен приєднуються до нагрівальної камери, притому антени пристосовані для обертання їх електричних осей в обидві сторони відносно поверхні опромінюваного матеріалу. Подібні конструкції, які мають кілька генераторів, характеризуються підвищеними енерговитратами, складним процесом рівномірного розподілу електромагнітного випромінювання в оброблюваному матеріалі і низькою експлуатаційною надійністю. Спроби реалізувати технічну задачу по поліпшенню рівномірності розподілу енергії в об'ємі камери за рахунок переміщення в теплоізольованій електрогерметичній камері випромінюючих антен призводять до збільшення апаратних витрат, знижують надійність і зменшують заповнюваність обсягу сушильної камери. Опромінення усього об'єму адсорбенту, що висушується, тільки з одного боку (зверху) [8] викликає зниження прозорості верхніх шарів адсорбенту для електромагнітного поля, при цьому висушений до абсолютного нуля адсорбент перегрівается при нерівномірному сушінні нижніх шарів, що призводить до втрати адсорбентом корисних властивостей і збільшення тривалості сушіння.

Поліпшити рівномірність нагріву можливо, якщо наявні моди коливань або частину з них включати по черзі. Додавання або, навпаки, вилучення будь-якої моди призводить до зміни загальної структури електричного поля. Ділянки з максимальною і мінімальною амплітудою зміщуються в просторі і можуть мінятися місцями. В результаті кожна ділянка обсягу камери нагріву по черзі підлягає впливу електромагнітних полів різної конфігурації та інтенсивності [9]. Саме при великій кількості таких комбінацій вплив мікрохвильової енергії може бути достатньо рівномірним.

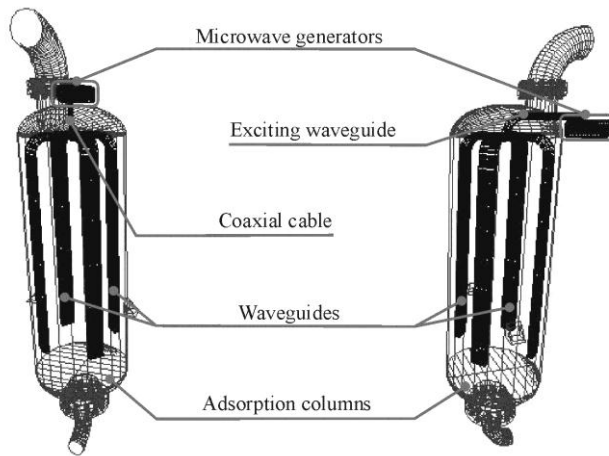


Рисунок 1. Адсорбційні стовпці з мікрохвильовими генераторами та встановленими хвильовими системами.

У цій роботі розглядається задача створення адсорбційного осушувача, з адсорбційними колонами, (Рис. 1.), що забезпечують сушку діелектричних матеріалів (адсорбенту КСМГ) з використанням енергії НВЧ-випромінювання. Конструкція повинна забезпечувати інтенсифікацію сушіння з використанням енергії НВЧ-випромінювання за рахунок перерозподілу електромагнітного випромінювання в усьому об'ємі адсорбенту, що висушується, уникаючи локальних перегрівів, і у той час при найменших апаратних витратах.

Методологія дослідження. Надане дослідження присвячене вивченню впливу внутрішнього дисектора на поширення мікрохвильової енергії в об'ємі адсорбенту, при заданій конфігурації хвильоводу та засобу його збудження. Принцип роботи внутрішнього дисектора полягає в порушенні структури електромагнітного поля. Як наслідок, деякі існуючі моди можуть бути пригнічені. Під дією дисектора умови збудження для різних мод залежать від повороту дисектора відносно плечей хвильоводу. Завдяки чому спектр електромагнітних коливань і, відповідно, структура поля постійно змінюється.

Розрахунок параметрів хвильоводу та потужності, що виділяється на вихідних портах хвильоводу, виконується в програмному забезпеченні Ansys HFSS™. Метод моделювання, який використовується програмою для обчислення повного тривимірного електромагнітного поля усередині конструкції, яка моделюється, базується на методі кінцевих елементів.

Картину поля біжучої хвилі всередині хвильоводу та пристрою можна визначити шляхом вирішення рівняння Максвелла [10].

Різні типи мікрохвильових пристроїв можна описати за допомогою падаючих та відбитих хвиль, які поширюються в досліджуваному об'ємі. Співвідношення між цими хвилями описується матрицею розсіювання, або матрицею S-параметрів, елементи якої описують фізичні параметри розсіювання. В мікрохвильовій технології матриця розсіювання використовується для опису мікрохвильових пристроїв, розподілу хвильової енергії, падаючих та відбитих хвиль [11]. Дуже важливо, що моделювання HFSS™ охоплює обсяг, в якому існують електричні та магнітні поля. Ці обсяги зазвичай включають у себе матеріали, що проводять електричний струм, а також діелектричні матеріали, включаючи повітря, яке оточує вказані матеріали [12-15].

Узагальнена S-матриця (1) описує, яка частка потужності, пов'язана з заданим збудженням поля, передається або відбивається в кожному порту хвильоводу. S-матриця для моделі з трьома портами виглядає наступним чином:

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

де:

- Усі величини матриці є комплексні числа.
- Величини a_i та b_i нормалізуються до поля з такою інтенсивністю, що несе один ватт потужності.
- $|a_i|^2$ визначає потужність, яка збуджується в порту i .
- $|b_i|^2$ визначає потужність переданого або відбитого поля у порту i .
- Повна модель поля у порту представляє собою суму поля, яке збуджене у порту та всіх відбитих / переданих полів.
- Фаза a_i та b_i являють собою фазу падаючого та відбитого / переданого поля за умов $t = 0$
- $\angle a_i$ являє собою фазовий кут поля збудження на порту i за умов $t = 0$.
- $\angle b_i$ являє собою фазовий кут відбитого або поширеного далі поля відносно поля збудження.
- S_{ij} це S-параметр, що описує, наскільки велика частина поля, яке збуджене в порту j відбивається назад або передається в порт i . Наприклад, S_{31} використовується для обчислення кількості енергії поля, яке збуджене у порту 1, та передається до порту 3. Фаза S_{31} визначає фазовий зсув, який відбувається, коли поле розповсюджується від порту 1 до порту 3 [16,17].

Визначення моделі. 3D-обчислення моделі прямокутного хвильоводу, що працює на основному типі хвилі H_{10} , в даному дослідженні виконуються з

основною частотою 2,45 ГГц. Випромінювальні антени виконані у вигляді вихідних каналів Н-плоских трійників. У дослідженні розглянуто конструкцію Х-подібного прямокутного хвелеводу зі збудженням від коаксіального кабелю.

Спочатку геометрія моделі хвелеводу, перед тим як розпочати дослідження, оптимізована за допомогою модуля Optimetrics з метою отримання максимального рівня напруженості електромагнітного поля в хвелеводі. Для цього параметризована геометрія моделі обчислюється у вибраному діапазоні значень змінних оптимізації. Цільова функція складається на основі значення напруженості електромагнітного поля для кожної змінної моделі в досліджуваному діапазоні. Оптимізація виконується шляхом порівняння результатів обчислення різних варіантів моделі з вибором найкращих значень змінних оптимізації.

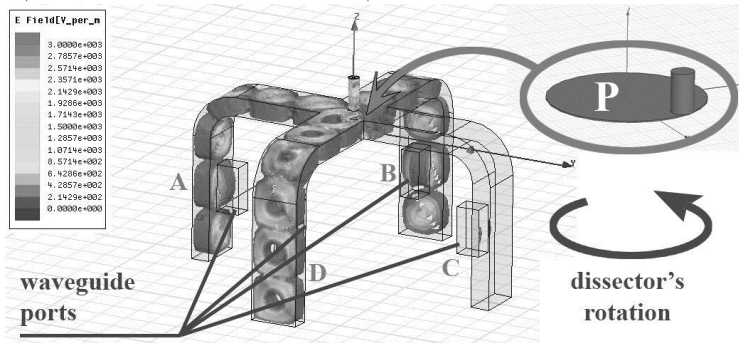


Рисунок 2. Х-образний прямокутний хвелевод із збудженням від коаксіального кабелю. Літера "P" визначає дисектор штирьового типу (Pin-type disconnector).

Лінійні розміри моделі хвелеводу, оптимізовані за допомогою модуля Optimetrics, є такі: висота хвелеводу 35 мм, ширина хвелеводу 88 мм, довжина плечей хвелеводу 547 мм, кут перетину плечей хвелеводу 90 градусів.

Як показано вище, отримання максимального рівня електромагнітної напруженості поля у хвелеводі не є достатньою умовою досягнення максимальної ефективності мікрохвильового нагрівача. Найважливішим завданням стабілізації режиму термообробки є підвищення рівномірності розподілу мікрохвильової енергії всередині нагрівальної камери, чому саме сприяє динамічна змінність загальної структури електромагнітного поля.

Отримані результати. Оптимізована модель хвелеводу (Рис. 2.) служить основою для дослідження впливу внутрішнього дисектора, розміщеного у хвелеводі, шляхом поетапного моделювання розподілу потужності між хвелеводними портами.

При цьому розподіл потужності залежить від повороту дисектора відносно плечей хвилеводу. На рисунку 3 показано розподіл напруженності електромагнітного поля в досліджуваній моделі хвилеводів з використанням дисектору.

Встановлено, що коли дисектор обертається у Х-подібному хвилеводі зі збудженням від коаксіального кабелю (Рис. 3.), спостерігається значна зміна загальної структури електромагнітного поля. Зображення електромагнітного поля (Рис. 3.) співвідносяться з графіками розподілу енергії між портами кожного з чотирьох плечей хвилеводу (Рис. 4.).

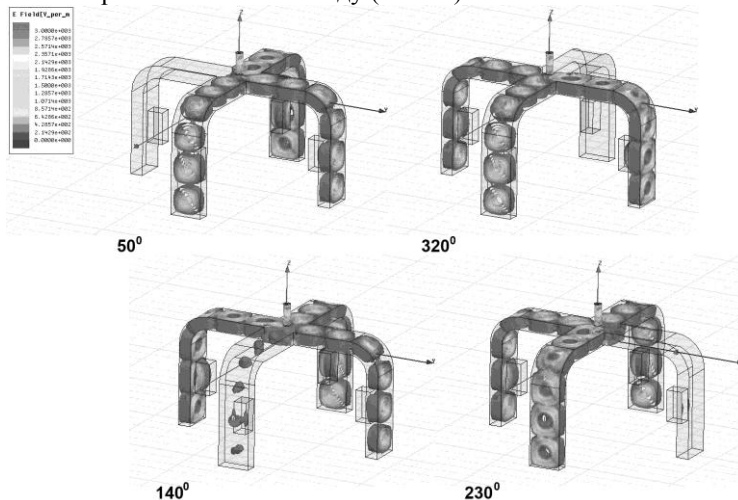


Рисунок 3. Картина електромагнітного поля в плечах Х-подібного хвилеводу зі збудженням від коаксіального кабелю в залежності від кута повороту дисектора.

В той самий час спостерігається рівномірний циклічний перерозподіл енергії в плечах хвилеводу (Рис. 4.), з невеликими втратами потужності (Рис. 5.).

Висновки. Проведене дослідження доводить можливість та доцільність використання Х-подібних хвилеводів зі збудженням від коаксіального кабелю при побудові адсорбційних осушувачів з регенерацією адсорбента за допомогою мікрохвильового випромінювання, а також придатності внутрішнього дисектора, який встановлений всередині хвилеводу, для створення бігової хвилі в порожнині адсорбційної колони з метою підвищення рівномірності впливу мікрохвильової енергії на об'єм адсорбенту.

Також експеримент показує що перевагу слід віддавати використанню Х-подібного хвильоводу, який збуджується за допомогою коаксіального кабелю, і діє спільно з внутрішнім дисектором.

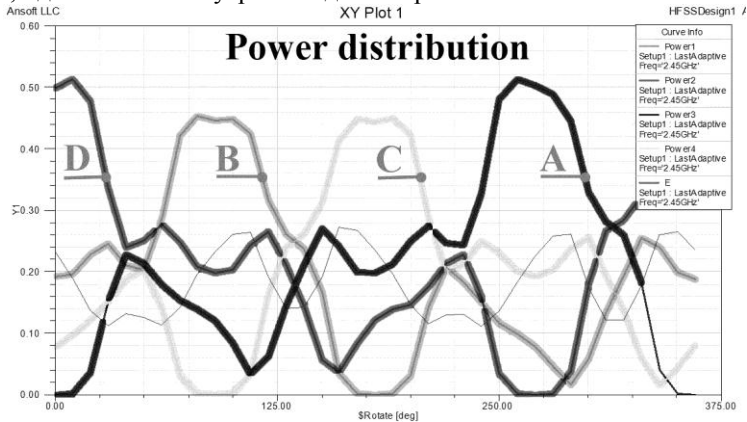


Рисунок 4. Картина розподілу потужності на портах (A, B, C, D) у Х-образному хвильоводі зі збудженням від коаксіального кабелю під час обертання дисектора.

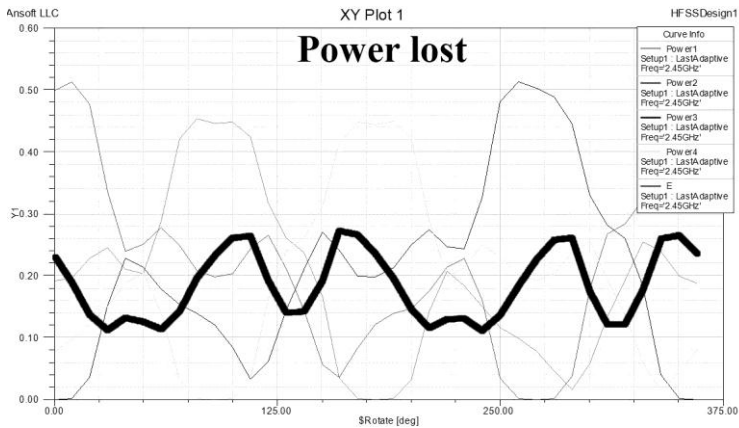


Рисунок 5. Картина втрат потужності у Х-образному хвильоводі з збудженням від коаксіального кабелю під час обертання дисектора.

Виконаний теоретичний експеримент відкриває перспективу подальших практичних досліджень щодо ефективності впливу мікрохвильового випромінювання на процес десорбції адсорбенту.

Список використаних джерел: 1. *Sophocles J. Orfanidis.*: Electromagnetic Waves and Antennas (2016), <http://www.ece.rutgers.edu/~orfanidi/ewa/ewa-2up.pdf>, last accessed 2017/02/10. 2. *Jones, S.:* Comparing Microwave to Conventional Heating and Drying Systems, http://www.chemicalprocessing.com/assets/wp_downloads/pdf/comparing-microwave-to-covnventional-heating-drying-systems-v2.pdf, last accessed 10/05/2017. 3. *Gao, F.:* Comparison of Microwave Drying and Conventional Drying of Coal. Science Queen's University, Canada (2010). 4. *Tanaka, K., Asakuma, et al., Phan C.:* Surface tension profiles of nanofluid containing surfactant during microwave irradiation. In: 29th Symposium of Malaysian Chemical Engineers (SOMChE) 2016, vol. 206, pp. 101-105. Miri, Malaysia (2017). 5. *Gareev, F.H.:* Pat. 2199064 RF. Ustanovka dlya sushki dielektricheskikh materialov svch-energiey. <http://www.freepatent.ru/patents/2199064>, last accessed: 2017/02/20. [in Russian] 6. *Monolakov V.A., Yudin V.V.:* Pat. 2113666 RF. Spособ sushki pilomaterialov. <http://documents.allpatents.com/l/18048118/RU2113666C1>, last accessed: 2017/02/20. [in Russian] 7. *Valeev G.G.:* Pat. 2115073 RF. Sushilnaya usta-novka. <http://www.freepatent.ru/patents/2115073>, last accessed: 2017/02/20. [in Russian] 8. *Vergasov A.A.:* Pat. 2111631 RF. uni-versalnaya sverhvyisokochastotnaya sushilnaya ustanovka (vari-antyi). <http://www.freepatent.ru/patents/2111631>, last accessed: 2017/02/20. [in Russian] 9. *Dobrotvorskiy S., Dobrovol'ska L., Aleksenko B.:* Computer simulation of the process of regenerating the adsorbent using microwave radiation in compressed air dryers. [Lecture Notes in Mechanical Engineering](#), Springer vol. 11236, 511-519 (2017). 10. *Berezin A.V., Markov M.B., Plyushchenkov B.D.:* Locally one-dimensional finite-difference scheme for the electrodynamic problems with given wavefront. Russian Academy of Science, Moscow (2005). 11. *Dobrotvorskiy S.S., Dobrovol'ska L.G., et al.,* The Use of Waveguides with Internal Dissectors in the Process of Regeneration of Industrial Adsorbents by Means of the Energy of Ultrahigh-Frequency Radiation. Proceedings of the International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange, DSMIE-2018, June 12-15, 2018, Sumy, Ukraine. 12. *Bankov S.E., Kurushin A.A. Razevig V.D.:* Analysis and optimization of three-dimensional microwave structures using HFSS™. Solon-Press. Moscow (2004). [in Russian] 13. ECE-329 Fields and Waves I. 21. Monochromatic waves and phasor notation. Phasor form of Maxwell's equations and damped waves in conducting media: Lecture Notes. ECE ILLINOIS Department of Electrical and Computer Engineering, <http://jsa.ece.illinois.edu/ece329/notes/329lect21.pdf>, last accessed 2017/02/10. 14. *Balanis K. A.:* Antenna Theory: Analysis and Design, Wiley & Sons, 2 nd edition, (1997). 15. *Solovyanova I.P., Naymushin M.P.,* Theory of wave processes. Electromagnetic Waves: A Training Manual. GOU VPO UGTU, Ekaterinburg (2005). [in Russian] 16. An Introduction to HFSS™: Fundamental Principles, Concepts, and Use. Ansoft, LLC. Pittsburgh (2009). 17. HFSS™ – High Frequency Structure Simulation. Manuals, Ansoft, 2004. – URL: www.ansoft.com. last accessed: 2017/02/20.

Надійшла до редколегії 25.06.2018

УДК 621.923

А. В. Беспалова, канд. техн. наук, В. Г. Лебедев, д-р техн. наук,
О.В. Фроленкова, ассистент, Т.В Чумаченко, канд. техн. наук,
Одесса, Украина

РАЗРЕЗАНИЕ КАМЕННЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И КЕРАМИЧЕСКОЙ ПЛИТКИ ПРИ СТРОИТЕЛЬНЫХ РАБОТАХ АЛМАЗНЫМИ ДИСКАМИ

У процесі ремонту і реставрації будівель часто розрізають керамічні плитки і блоки з Al_2O_3 і ZrO_2 . В даний час для цих цілей широко використовуються алмазні абразивні диски. Процес розрізання супроводжується значним виділенням тепла і нагріванням алмазного диска. При температурі близько 600° міцність диска на розрив зменшується в 2 рази і відбувається графітизація алмазних зерен. Таким чином, при розрізанні алмазним кругом кам'яних і будівельних матеріалів, температура нагріву кола не повинна перевищувати $600^\circ C$. В роботі виконано математичне моделювання процесу нагрівання алмазного відрізного круга на металевій основі при розрізанні керамічних матеріалів для визначення часу безперервної роботи до критичної температури $600^\circ C$. Результати моделювання, представлені на графіках, показали залежність температури нагрівання кола від діаметра останнього, частоти обертання, хвилинної подачі, від зернистості і товщини кола. Показано, що шляхом підбору відповідних характеристик процесу час безперервної роботи може бути близько 10 - 12 хв без застосування примусового охолодження.

Ключові слова: алмазний відрізний диск, температура диска, кераміка ZrO_2

В процессе ремонта и реставрации зданий часто разрезают керамические плитки и блоки из Al_2O_3 и ZrO_2 . В настоящее время для этих целей широко используются алмазные абразивные диски. Процесс разрезания сопровождается значительным тепловыделением и нагревом алмазного диска. При температуре порядка 600° прочность диска на разрыв уменьшается в 2 раза и происходит графитизация алмазных зерен. Таким образом, при разрезании алмазным кругом каменных и строительных материалов, температура нагрева круга не должна превышать $600^\circ C$. В работе выполнено математическое моделирование процесса нагрева алмазного отрезного круга на металлической основе при разрезании керамических материалов для определения времени непрерывной работы до критической температуры $600^\circ C$. Результаты моделирования, представленные на графиках, показали зависимость температуры нагрева круга от диаметра последнего, частоты вращения, минутной подачи, от зернистости и толщины круга. Показано, что путем подбора соответствующих характеристик процесса время непрерывной работы может быть порядка 10 – 12 мин без применения принудительного охлаждения.

Ключевые слова: алмазный отрезной диск, температура диска, керамика ZrO_2

During the repair and restoration of buildings, ceramic tiles and blocks of Al_2O_3 and ZrO_2 are often cut. At present diamond abrasive disks are widely used for these purposes. The cutting process is accompanied by considerable heat release and heating of the diamond disk. At a temperature of about 600° , the tensile strength of a disc is reduced by a factor of 2 and graphitization of diamond grains occurs. Thus, when cutting stone and building materials with a diamond circle, the disk heating temperature should not exceed $600^\circ C$. In the work, mathematical modeling of the heating of a diamond cutting disk on a metal base was performed while cutting ceramic materials to determine the time of continuous operation to a critical temperature of $600^\circ C$. The simulation results presented in the graphs showed the dependence of the heating temperature of the disk on the diameter of the latter, the speed of rotation, the minute feed, the grain size and the thickness of the disk. It is shown that by selecting

appropriate process characteristics the time of continuous operation can be of the order of 10 - 12 min without the use of forced cooling.

Key words: diamond cutting disk, disk temperature, ceramics ZrO_2

В процессе ремонта и реставрации зданий часто прорезать проемы и гнезда, куда заводятся усиливающие элементы.

Такие работы часто выполняются в известняке-ракушечнике, бетоне, граните, базальте, в керамических материалах в частности при разрезании керамической плитки из Al_2O_3 и ZrO_2

В настоящее время для этих целей широко используются алмазные абразивные диски. Алмазные абразивные диски это в сущности алмазные отрезные круги на металлической связке. Алмазный слой напыляется на металлический диск из легированной стали. Алмазные отрезные круги на керамической связке не изготавливаются, поскольку температура спекания таких кругов при изготовлении выше, чем температура графитизации алмаза.

Основное преимущество алмазных инструментов это прежде всего возможность получения высокой производительности обработки и размерной стойкости, превышающих аналогичные показатели традиционных инструментов на основе карборунда.

Например, если производительность окантовки твердых пород камня карборундовыми кругами составляла в среднем $100\text{--}150\text{ см}^3/\text{мин}$, то алмазными — $400\text{--}600\text{ см}^3/\text{мин}$.

Значительно повышается при этом точность выполнения операций и качество обработанной поверхности. При алмазной обработке весьма существенным с точки зрения современных требований является возможность осуществления механизации трудоемких процессов и автоматизации основных операционных циклов.

Разрезание твердых строительных материалов осуществляется дисковыми алмазными кругами скорость вращения, которых, а, следовательно, и скорость резания составляет $35\text{--}50\text{ м/с}$. Ввиду высокой интенсивности процесса резания и интенсивного микростружкообразования, процесс разрезания сопровождается значительным тепловыделением.

Следует отметить, что диск алмазного круга, на который наносится алмазное абразивное покрытие изготавливается из обычной малолегированной стали типа Сталь 9ХФМ, (0,9% углерода и до 1% хрома, ванадия и молибдена). Эти стали обладают достаточно высокой прочностью на разрыв, чтобы противостоять большим центробежным силам, но невысокой теплоустойчивостью. Прочностные характеристики этих сталей при нагреве до температур $500\text{--}600\text{ }^\circ\text{C}$ уменьшаются практически в 2 раза, что может вызвать заклинивание или даже поломку и разрыв инструмента при работе.

Кроме того, графитизация алмазных режущих зерен, т.е. превращение тетрагонального углерода в гексагональный также происходит при

температуре порядка 600 °С. Следовательно работа при такой температуре круга может привести к потере алмазонаосного слоя.

Таким образом при разрезании алмазным кругом каменных и строительных материалов, температура нагрева круга не должна превышать 600 °С. Следовательно время работоспособности алмазного отрезного круга — это время за которое он нагревается при непрерывной работе до температуры 600 °С. Чем больше это время – тем выше работоспособность алмазного круга.

В настоящее время нет базы данных по назначению режимов разрезания кругами из СА, которые бы определяли закономерности нагрева и охлаждения алмазного отрезного круга во время работы.

Нет методики определения времени работы до критической температуры и не рассмотрены вопросы увеличения ресурса времени работы до критической температуры.

Алмазные круги выпускаются различных размеров и разной зернистости, поэтому экспериментальное исследование этого вопроса очень трудоемкое и длительное. Кроме того, нет надежной методики, которая позволяла бы осуществить эти измерения. В настоящей работе проведено математическое моделирование, которое дает возможность определить время безопасной работы до критической температуры. Кроме того, промоделированы некоторые способы повышения ресурса времени. Таким образом можно создать базу предпочтительных режимов работы и экспериментально точно уточнить математическую модель.

Цель работы – математическое моделирование процесса нагрева алмазного отрезного круга на металлической основе при разрезании каменных и керамических материалов для определения времени непрерывной работы до критической температуры.

Объект исследования – процесс разрезания каменных и керамических строительных материалов отрезными кругами из синтетических сверхтвердых материалов.

Предмет исследования – разрезание керамических строительных материалов из ZrO_2 .

Для достижения цели работы необходимо решить следующие задачи:

1. Определить сил резания единичным зерном во время процесса разрезания
2. Определить тепловую мощность, развиваемая единичным зерном при резании керамического материала.
3. Определить форму пятна контакта круга с изделием, определить количество зерен действующих в пятне контакта и величина суммарного теплового потока при разрезании.
5. Разработать блок-схему и программа расчетов (в среде MathCad),

которая дает возможность определить суммарные силы резания, контактную температуру разрезания, схему нагрева круга этой температурой.

6. На основании полученных данных определить температура нагрева участка круга, находящегося в контакте с изделием, температура по радиусу круга, охлаждение нагретого круга воздушным потоком и приrost температуры круга на каждый оборот.

Анализ литературных данных и постановка проблемы.

Не смотря на большое количество литературы по разрезанию каменных и керамических материалов алмазными кругами практически нет сведений о параметрах процесса разрезания, которые позволяют управлять температурой круга во время работы. Это не дает возможности разрабатывать оптимальную технологию разрезания, определять время работы круга до критической температуры нагрева, а также не дает возможности разработать эффективную методику охлаждения круга.

Большое количество работ посвящено энергетике процесса разрезания, износу отрезных кругов и способам поддержания энергетических характеристик процесса в определенных параметрах.

В работе [1] автор подробно рассматривает процесс разрезания природных камней алмазным дисковым инструментом. Автор весьма квалифицированно определяет характеристики алмазных зерен, количество реально режущих зерен в пятне контакта круга с изделием. На этой базе автор определяет единичные и суммарные силы резания. Однако нет тепловых расчетов ни по отношению к обрабатываемой детали, ни по отношению нагрева алмазного круга на металлической основе. Следует также отметить, что все материалы относятся к 1979 году и естественно нуждаются в обновлении и пересмотре. В работе [6] рассматриваются общие вопросы прогресса в абразивной обработки, однако нет данных о температуре нагрева алмазных кругов на металлической связке как нет и данных по поводу алмазных отрезных дисков. В работе [7] рассмотрены вопросы износа алмазного отрезного круга, в зависимости от содержания в алмазоносном слое карбидов бора. Вопросы нагрева круга при обработке не рассмотрены. В работе [8] дается методика определения и повышения жесткости в узлах механизмов с алмазными пилами. Эти материалы также не могут быть использованы в настоящей работе. В работе [9] исследуются вопросы – энергетического характера – зависимость сил резания и мощности резания от конкретных условий и режимов обработки. Однако вопрос энергетических затрат на нагрев круга не рассмотрен. В работе [10] рассматривается износ алмазных секторов. Математическими методами авторы предсказывают износ круга в зависимости от количества удаляемой стружки. Тепловые эффекты в работе не рассмотрены. В работе [11] рассмотрены энергетические характеристики процесса. Силы резания и мощность связываются с количеством удаляемой стружки, что может дать возможность обоснованно

назначать режимы резрезания. В работе [12] рассматривается влияние скорости периферии круга на износ. Эти исследования также дают возможность более обосновано назначать режим резрезания. Тепловые вопросы не рассмотрены. В работе [13] рассматривается вопрос автоматического управления скоростью пилы и подачи на зуб, что дает возможность повысить эффективность процесса резрезания. Тепловые вопросы также не рассматриваются и кроме того, результаты исследования процесса резрезания дисковой пилой не могут быть полностью перенесены на процесс резрезания диском. В работе [14] зависимости удельной энергии резрезания и удельной энергии бурения. Тепловые вопросы не затрагиваются. В работе [15] рассматриваются вопросы износа алмазной фрезы по измерениям силы резрезания. Несмотря на тщательность эксперимента, проведенного на современном оборудовании результаты, не могут быть приложены к теме настоящей работы.

Можно сделать вывод, что в настоящее время в литературе нет данных о нагреве алмазного круга на металлической основе во время работы

Материалы и методы исследования. Исследования проведены с применением математического моделирования и прямых экспериментов. В качестве материала используется плитка и брикеты из оксида циркония, в качестве режущего инструмента шлифовальные круги из синтетических алмазов на металлической основе.

Экспериментальные и аналитические исследования.

В работе [1] для определения единичных сил резрезания применялась несколько измененная методика, изложенная в работе [3]. В настоящей работе также была использована методика работы [3] с некоторыми изменениями. Использовалась величина глубины вдавливания алмазной пирамидки, что дало возможность связать составляющую P_u с величиной углубления зерна в металл.

$$P_z = 7,15 \times H_v \times h^2, \quad (1)$$

где: H_v твердость разрезаемого материала по шкале Виккерса, h – средняя величина углубления зерна в материал. Произведение $P_z \cdot V_{кр}$ (скорость круга) дает значение тепловой мощности резрезания отдельным зерном. Для определения последней величины использовалась методика описанная в работе [2]. Использование этой методики дает возможность по тепловому импульсу от микротермопары определить количество реально режущих зерен в дуге контакта круга с изделием, расстояние между режущими зернами, удельное количество режущих зерен и измеряя реальный съем материала на каждом проходе и деля величину этого съема на количество зерен, можно определить среднюю величину углубления зерна в шлифуемый или разрезаемый материал. Рис.1.

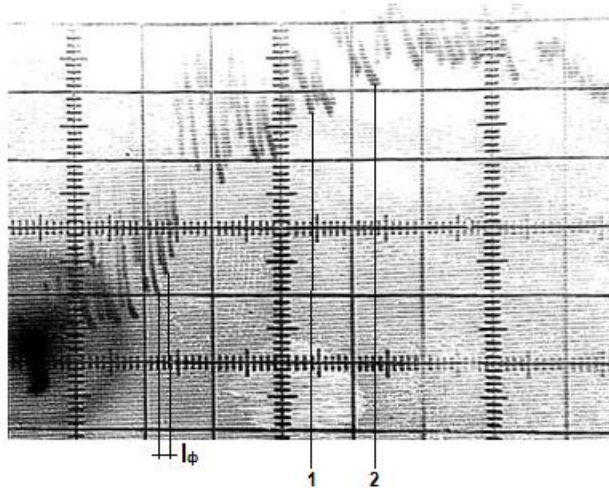


Рисунок 1. Характерный тепловой импульс на котором видны температурные всплески от каждого реально режущего зерна. I_ϕ -фактический временной интервал между соседними режущими зёрнами. 1, 2- характерные импульсы от каждого режущего зерна. Скорость развертки 2,2 мс/клетка. Вертикальный масштаб- 150°С/клетка. Осциллограф С8-9А

Если остановится на примере разрезания брикета из ZrO_2 вертикальной подачей как показано на рис.2, то можно ввести следующие обозначения.

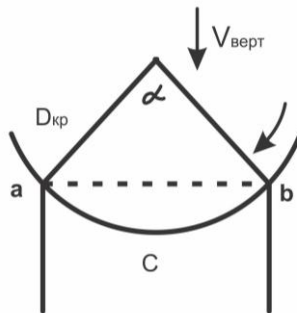


Рис.2. Схема разрезания образца из керамики ZrO_2 алмазным разрезным кругом на металлической основе

S- ширина круга, D- диаметр круга, $V_{кр}$ -скорость круга, $V_{верт}$ -скорость вертикальной подачи, n -частота вращения. Хорда сектора части круга, находящейся в данный момент в пределах образца, $ab=C$. α – угол сектора, L-длина дуги контакта равная

$$L_{\text{конт}} = 2 \arcsin \frac{c}{D} \cdot R, \quad (2)$$

Для ориентировочного расчета определим площадь контакта режущей кромки круга с изделием. Она очевидно будут равна $F_{\text{конт}} = L_{\text{конт}} \cdot S$ и при проекции на плоскость будет представлять из себя вытянутый прямоугольник. Если взять промежуток времени от точки а до точки б, то время теплового воздействия от точки а до точки б может рассматриваться как некоторый короткий промежуток времени равный $\tau = L_{\text{конт}} / V_k$. Таким образом сведем задачу к мгновенному плоскому источнику. Погрешности, возникающие от использования этой модели, могут быть определены в будущем при экспериментальных измерениях.

Атмосфера, в которой работает шлифовальный круг состоит из пограничного слоя воздуха, который существует около круга независимо от его структуры и пористости. [Леб Чум]. Это в свою очередь означает, что воздух при шлифовании интенсивно обдувает шлифуемую поверхность и можно ожидать существенного снижения температуры, тем более, что сброс тепла в пределах одного оборота круга осуществляется с большей части его поверхности. Для определения количества тепла уносимого с поверхности круга определим коэффициент теплоотдачи для данных условий.

Для оценки этого количества необходимо найти коэффициент конвективного теплообмена между движущейся средой и шлифуемой поверхностью (стенкой).

Количество теплоты, переданное в процессе теплоотдачи, определяется по уравнению Ньютона-Рихмана:

$$Q = \alpha (t_{cm} - t_{ж}) F, \quad (3)$$

где α - коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); $t_{ж}$, t_{cm} – средние температуры жидкости и стенки, °С; F – поверхность стенки, м²; Q – тепловой поток (количество теплоты), Вт (Дж); τ – время, с. Коэффициент теплоотдачи α – характеризует интенсивность теплообмена между поверхностью тела и окружающей средой. Коэффициент α показывает, какое количество тепла передается от единицы поверхности стенки к жидкости в единицу времени при разности температур между стенкой и жидкостью в 1 градус (К),

$$[\alpha] = \left[\frac{Q}{F(t_{cm} - t_{ж})} \right] = \left[\frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \times \text{с} \times \text{К}} \right] = \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \times \text{К}} \right] \quad (4)$$

Определение α является основной задачей расчета теплообменных аппаратов. Обычно коэффициент теплоотдачи определяют из критериальных уравнений, полученных преобразованием дифференциальных уравнений гидродинамики и конвективного теплообмена методами теории подобия. Проще всего коэффициент теплообмена определить через критерий Нуссельта по выражениям:

$$\alpha = \frac{Nu \times \lambda}{\ell} \quad (5)$$

и

$$Nu = 0.008 \times Re^{0.9} \times Pr^{0.8} \quad (6)$$

где,

$$Re = \frac{\omega \ell}{\nu} = \frac{\omega \ell \rho}{\mu}, \quad (7)$$

критерий Рейнольдса, который характеризует гидродинамический режим потока при вынужденном движении и является мерой соотношения сил инерции и вязкого трения;

$$Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{c\mu}{\lambda}, \quad (8)$$

критерий Прандтля, который характеризует физико-химические свойства теплоносителя и является мерой подобия температурных и скоростных полей в потоке;

где ℓ – определяющий размер, м; ρ – плотность теплоносителя, кг/м³; $\Delta t = t_{ст} - t_{ж}$ – температурный напор между стенкой и теплоносителем, °C; λ – коэффициент теплопроводности теплоносителя, Вт/(м·K); μ – динамический коэффициент вязкости, Па·с; c – теплоемкость теплоносителя, Дж/(кг·K); τ – время процесса, с, ω – скорость движения теплоносителя м/с.

Расчет критерия Nu для скорости воздушного потока 30 – 50 м/с и для нормальной температуры воздуха в цехе 20 °C = 293 °K, по приведенным формулам, составляет 51,34. Соответственно коэффициент теплообмена α будет, согласно формуле 3, $\alpha = 445$ Вт/м²·°K.

Для того, чтобы определить количество теплоты уносимой с поверхности пятна контакта круга с деталью необходимо перемножить длину дуги контакта круга с изделием и величину поперечной подачи.

Блок-схема программы расчетов показана на рис.3. Расчеты проводились при изменении параметров в следующих пределах: (см. программу MathCad).

Результаты расчетов показаны на рис. 4 – 8.

Результаты моделирования показали, величина зернистости отрезного круга значительно влияет на важные параметры работы. Суммарная сила резания снижается несмотря на то, что единичная сила резания возрастает. Это объясняется тем, что при увеличении зернистости резко уменьшается количество одновременно работающих зерен. Потому если нет особых требований по шероховатости поверхности выгоднее работать более крупнозернистым кругом, несмотря на его более высокую стоимость. Согласно изменению суммарной силы резания, законы изменения мощности резания и температуры нагрева круга за 1 минуту работы, подчиняются той же закономерности. Температура круга за один оборот медленно снижается, зато совершенно естественно увеличивается время работы до критической температуры.

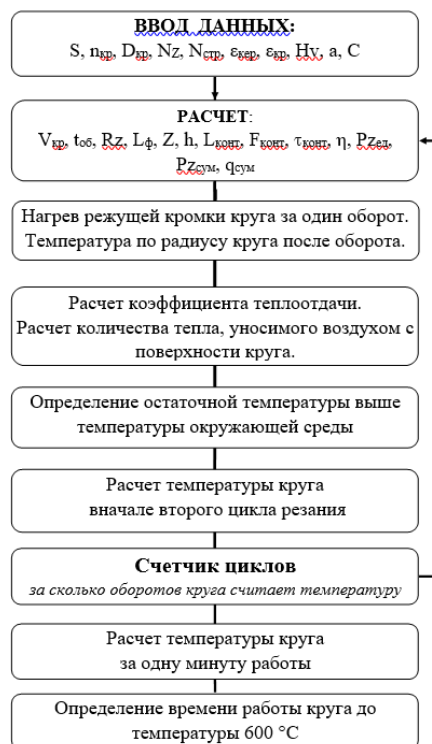


Рис.3. Блок-схема программы расчетов

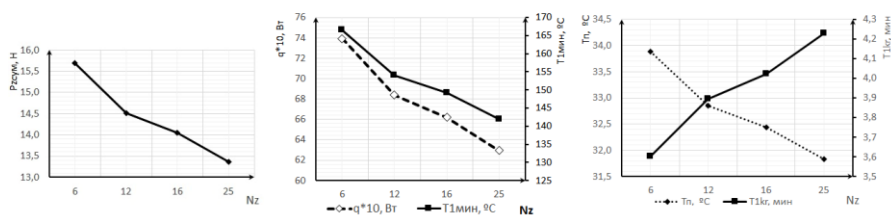


Рис.4. Зависимость параметров разрезания от изменения зернистости круга

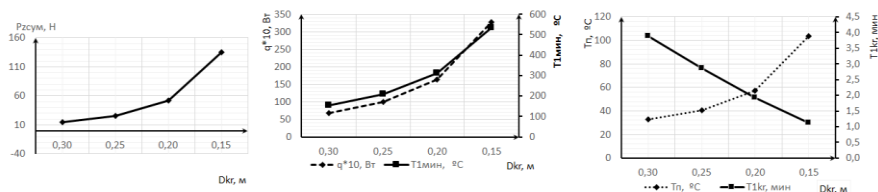


Рис.5. Зависимость параметров резания от изменения диаметра отрезного круга

Суммарная сила резания, мощность и нагрев круга за 1 мин. возрастают. Температура нагрева круга за 1 оборот возрастает. Время работы до критической температуры значительно снижается.

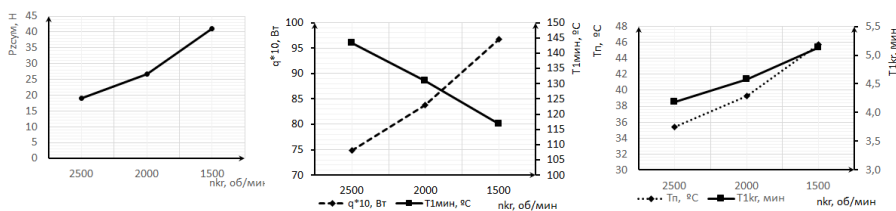


Рис.6. Зависимость параметров резания от изменения частоты вращения отрезного круга

Уменьшение частоты вращения вызывает увеличение суммарной силы резания, мощности резания, температуры нагрева круга за 1 оборот. Время работы до критической температуры значительно увеличивается.

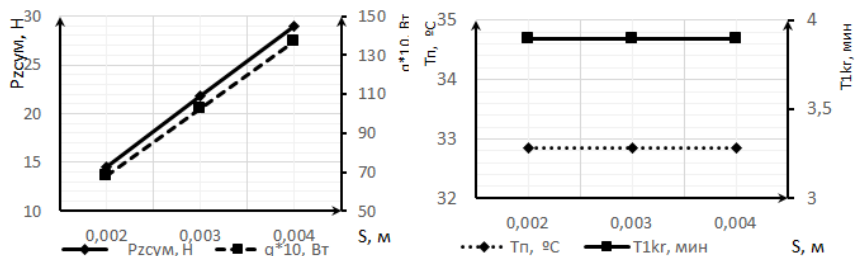


Рис.7. Зависимость параметров резания от изменения толщины отрезного круга

При увеличении толщины отрезного круга как и ожидалось возрастает суммарная сила P_z и мощность резания. Все остальные параметры остаются без изменения. Причина этого в том, что остается неизменной интенсивность теплового потока.

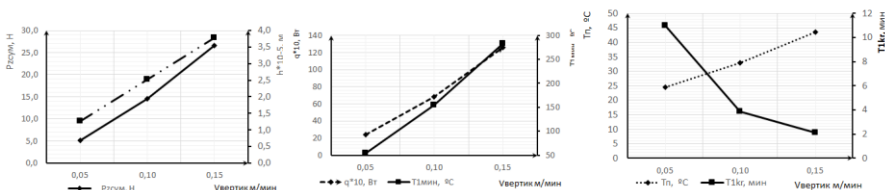


Рис.8. Зависимость параметров разрезания от изменения величины вертикальной подачи отрезного круга

При увеличении вертикальной подачи возрастает суммарная сила резания. Нагрузка на режущее зерно увеличивается за счет увеличения средней величины внедрения зерна в материал. Мощность резания и температура нагрева круга за 1 минуту возрастает. Также возрастает нагрев круга за 1 оборот. Время работы до критической температуры значительно уменьшается.

Обсуждение

Математическое моделирование показало, что металлический диск – основа алмазного круга во время работы существенно нагревается.

Практически все элементы режимов разрезания влияют на температуру круга, хотя и в разной мере. Наибольшее влияние оказывает величина вертикальной подачи.

Частота вращения круга и изменение его диаметра влияют практически одинаково, поскольку скорость резания зависит как от частоты вращения, так и от диаметра круга.

Изменение зернистости отрезного круга значительно влияет на его нагрев. Зависимость здесь достаточно сложная поскольку увеличение размера зерна увеличивает единичную силу резания и тепловую мощность от каждого отдельного зерна. Однако при этом уменьшается количество зерен одновременно участвующих в работе. В нашем случае в теплообразовании принимает участие меньшее количество более мощных тепловых источников. Однако увеличение мощности каждого единичного источника не может компенсировать уменьшение их количества. Это явление необходимо проверить на других кругах например на керамической связке.

По результатам моделирования можно сказать, что для обеспечения максимальной тепловой стойкости круга следует выбирать круги зернистости не менее 25 и работать при скорости вертикальной подачи не более 0,05 м/мин.

Заключение.

В результате проведенного математического моделирования решены следующие вопросы:

1. Определена сила резания единичным зерном во время процесса

разрезания

2. Определена тепловая мощность, развиваемая единичным зерном при резании

керамического материала.

3. Определена форму пятна контакта круга с изделием, определено количество зерен действующих в пятне контакта и величина суммарного теплового потока при разрезании.

5. Разработана блок-схема и программа расчетов (в среде MathCad), которая дает возможность определить суммарные силы резания, контактную температуру разрезания, схему нагрева круга этой температурой.

6. На основании полученных данных определена температура нагрева участка круга, находящегося в контакте с изделием, температура по радиусу круга, охлаждение нагретого круга воздушным потоком и приrost температуры круга на каждый оборот.

Список использованных источников: 1. В. А. Александров. Обработка природного камня алмазным дисковым инструментом. Киев, Наукова Думка, 1979. 2. Н.Н. Клименк В.Г. Лебедев, и др. Методика измерения температур шлифования термопарами при обработке наплавленных и напыленных поверхностей машиностроительных деталей. Физические и компьютерные технологии (Труды 20-й Международной научно-практической конференции, 23-24 декабря 2014). Д: ЛИРА. – Харків, 2015. – С. 34-38. 3. Редько С.Г. Процессы теплообразования при шлифовании металлов / С.Г. Редько. – Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1986. – 231 с. 4. Маслов Е.Н. Теория шлифования материалов / Е.Н. Маслов. – М.: Машиностроение, 1984. – 320 с. 5. Горелов В.А., Алексеев С.В. Особенности механической обработки деталей из керамических материалов М.: «Известия МГТУ МАМИ» № 2(14), 2012, т. 2. С. 64 – 67. 6. Dongming Guo. Advances in abrasive technology IX. Trans Tech Publication. Ueticon-Zuerich, 2006. 7. Islak S. Kastamonu, Turkey Çelik H. Firat. Effect of sintering temperature and boron carbide content on the wear behavior of hot pressed diamond cutting segments. Science of Sintering. 2015; 47(2):131 – 143. 8. Linh Vo Tung, Yong Zang Calculation of the Stiffness in the Roll Tensioning of the Circular Saw Blade MATEC Web of Conferences. 2016;51:01007 DOI 10.1051/mateconf/20165101007. 9. S. Turchetta Cutting Force in Stone Machining by Diamond Disk Advances in Materials Science and Engineering. 2010;2010 DOI 10.1155/2010/631437. 10. Qin Sun, Jinsheng Zhang, Jibo Hu China FAHP and TOPSIS Prediction of Diamond Segments Wear When Using Frame Saw to Cut Granites. Mathematical Problems in Engineering. 2017;2017 DOI 10.1155/2017/4031917. 11. S. Turchetta.W. Polini, I. S. Buyuksagis Investigation on Stone Machining Performance Using Force and Specific Energy Advances in Mechanical Engineering. 2009;1DOI 10.1155/2009/175817. 12. Siniša Dunda Zagreb, Croatia. Influence of the circular saw disc peripheral velocity on diamond tool consumption during dimension stone cutting. 13. Ugur Simsir Torque-Controlled Adaptive Speed Control on a CNC Marble Saw Machine Advances in Mechanical Engineering. 2015;7(2) DOI 10.1155/2014/839827. 14. Davor Antoljak, Trpimir Kujundžić, Tomislav Korman, Dalibor Kuhinek Dependency of specific energy of rock cutting on specific drilling energy. Rudarsko-geološko-naftni Zbornik. 2018;33(3):23-32. 15. W. Polini, S. Turchetta Monitoring of Diamond Mill Wear in Time Domain during Stone Cutting Using Cutting Force Measurements. Advances in Mechanical Engineering. 2009;1 DOI 10.1155/2009/353504. 16. Т.В. Чуmachenko, В.Г. Лебедев. С.В. Марчук Охлаждение воздушной и воздушнокапельной струей при шлифовании керамических покрытий.// Наукові нотатки. Науковий збірник ЛНТУ, Випуск 41, Луцьк. 2013.

Bibliography (transliterated): 1. V. A. Aleksandrov. Obrabotka prirodnogo kamnya almaznym diskovym instrumentom. Kiev, Naukova Dumka, 1979. 2. N.N. Klimenk V.G. Lebedev, i dr. Metodika

izmereniya temperatur shlifovaniya termoparami pri obrabotke naplavlennyh i napylnykh poverhnostej mashinostroitelnyh detalej. Fizicheskie i kompyuternye tehnologii (Trudy 20-j Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, 23-24 dekabrya 2014). D: LIRA. – Harkiv, 2015. – S. 34-38. 3. *Redko S.G.* Processy teploobrazovaniya pri shlifovanii metallov / *S.G. Redko*. – Saratov: Izd-vo Sarat. un-ta, 1986. – 231 s. 4. *Maslov E.N.* Teoriya shlifovaniya materialov / *E.N. Maslov*. – M.: Mashinostroenie, 1984. – 320 s. 5. *Gorelov V.A., Alekseev S.V.* Osobennosti mehanicheskoy obrabotki detalej iz keramicheskikh materialov M.: «Izvestiya MGTU MAM» № 2(14), 2012, t. 2. S. 64 – 67. 6. *Dongming Guo.* Advances in abrasive technology IX. Trans Tech Publication. Ueticon-Zuerich, 2006. 7. *Islak S. Kastamonu,* Turkey *Celik H. Firat.* Effect of sintering temperature and boron carbide content on the wear behavior of hot pressed diamond cutting segments. Science of Sintering. 2015; 47(2):131 – 143. 8. *Linh Vo Tung, Yong Zang* Calculation of the Stiffness in the Roll Tensioning of the Circular Saw Blade MATEC Web of Conferences. 2016;51:01007 DOI 10.1051/mateconf/20165101007. 9. *S. Turchetta* Cutting Force in Stone Machining by Diamond Disk Advances in Materials Science and Engineering. 2010;2010 DOI 10.1155/2010/631437. 10. *Qin Sun, Jinsheng Zhang, Jibo Hu* China FAHP and TOPSIS Prediction of Diamond Segments Wear When Using Frame Saw to Cut Granites. Mathematical Problems in Engineering. 2017;2017 DOI 10.1155/2017/4031917. 11. *S. Turchetta.W. Polini, I. S. Buyuksagis* Investigation on Stone Machining Performance Using Force and Specific Energy Advances in Mechanical Engineering. 2009;1DOI 10.1155/2009/175817. 12. *Sinisa Dunda* Zagreb, Croatia. Influence of the circular saw disc peripheral velocity on diamond tool consumption during dimension stone cutting. 13. *Ugur Simsir* Torque-Controlled Adaptive Speed Control on a CNC Marble Saw Machine Advances in Mechanical Engineering. 2015;7(2) DOI 10.1155/2014/839827. 14. *Davor Antoljak , Trpimir Kujundzic, Tomislav Korman, Dalibor Kuhinek* Dependency of specific energy of rock cutting on specific drilling energy. Rudarsko-geolosko-naftni Zbornik. 2018;33(3):23-32. 15. *W. Polini, S. Turchetta* Monitoring of Diamond Mill Wear in Time Domain during Stone Cutting Using Cutting Force Measurements. Advances in Mechanical Engineering. 2009;1 DOI 10.1155/2009/353504. 16. *T.V. Chumachenko, V.G. Lebedev. S.V. Marchuk* Ohlazhdenie vozduшной i vozdushnokapelnoj struej pri shlifovanii keramicheskikh pokrytij.// Naukovi notatki. Naukovij zbirnik LNTU, Vipusk 41, Luck .2013.

Надійшла до редколегії 25.06.2018

УДК 621.793.79

Верещака А.А., канд. техн. наук, Москва, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОСАЖДЕНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ МНОГОСЛОЙНО- КОМПОЗИЦИОННОГО НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО ПОКРЫТИЯ Ti-TiN-(Ti,Al,Si)N.

Исследуется процесс осаждения и свойства многослойно-композиционного наноструктурированного покрытия Ti-TiN-(Ti,Al,Si)N. Представлены данные по микротвердости, прочности адгезии покрытия и химическому составу покрытия. Выявлен механизм формирования нано и субнанослоев и влияние наноструктуры на рост зёрен в пределах нанометрического диапазона. Исследуются особенности изнашивания, разрушения и трещинообразования твердосплавных пластин с покрытием на различных участках передней поверхности. Исследованы диффузионные процессы на границах покрытия с обрабатываемым материалом и твердосплавным субстратом и между слоями покрытия.

Ключевые слова: многослойно-композиционные покрытия, прочность адгезии покрытия, диффузионные процессы.

Досліджується процес осадження та властивості багатошарово-композиційного наноструктурированого покриття Ti-TiN- (Ti, Al, Si) N. Представлені дані по микротвердості, міцності адгезії покриття і хімічному складом покриття. Виявлено механізм формування нано і субнанослоєв і вплив наноструктури на зростання зерен в межах нанометричного діапазону. Досліджуються особливості зношування, руйнування і утворення тріщин твердосплавних пластин з покриттям на різних ділянках передньої поверхні. Досліджено дифузійні процеси на кордонах покриття з оброблюваним матеріалом і твердосплавним субстратом і між шарами покриття.

Ключові слова: багатошарово-композиційні покриття, міцність адгезії покриття, дифузійні процеси.

The deposition process and the properties of a multilayer-composite nanostructured coating of Ti-TiN- (Ti, Al, Si) N are studied. Data on microhardness, coating adhesion strength and chemical composition of the coating are presented. The mechanism of formation of nano and subnanosloides and the influence of nanostructure on grain growth within the nanometer range are revealed. The peculiarities of wear, fracture and cracking of carbide coated plates in different parts of the front surface are investigated. Diffusion processes at the coating boundaries with the material to be treated and the carbide substrate and between the coating layers are investigated.

Key words: multilayer composite coatings, coating adhesion strength, diffusion processes.

Введение.

Функциональные покрытия с нанослойной архитектурой достаточно активно исследуются и находят все большее применение при производстве металлорежущего инструмента. При этом лидирующие позиции в научных исследованиях и на рынке занимают покрытия, включающие в свой состав соединения алюминий, что объясняется их высокой твердостью и износостойкостью, а также – способностью формировать оксидные пленки, позитивно влияющие на процесс резания [1-3].

Несмотря на то, что покрытие $(\text{Ti},\text{Al})\text{N}$ достаточно хорошо изучено и широко применяется, создание нанокомпозитов на его основе позволяет получить покрытия с существенно улучшенными свойствами. В частности, в работе [4] исследовали покрытие $\text{TiN}-(\text{Ti},\text{Al})\text{N}$ с нанометрическими слоями, при толщине двойного нанослоя равного $\lambda = 6 - 30$ нм. Максимальную микротвердость (28 ГПа) имели покрытия с $\lambda = 12$ нм, а наибольшую коррозионную стойкость – с $\lambda = 20$ нм. Rizzoni др.[5] исследовали нано многослойное покрытие $(\text{Ti},\text{Al})\text{N}-\text{AlN}$ (40 at.% Al) с $\lambda = 4.5$ нм при общей толщине 2.2. мкм. При фазовом анализе в составе покрытия была обнаружена фаза гексагонального AlN, тройная фаза гексагонального Ti_2AlN и фаза кубического $(\text{Ti},\text{Al})\text{N}$ с высоким содержанием Al. Еще одним важным направлением совершенствования свойств нанослойных покрытий на основе TiAlN является добавление в их состав кремния. В частности, Zhui др. [6] изучали свойства покрытия $\text{Ti}_{0.5}\text{Al}_{0.4}\text{Si}_{0.1}\text{N}$ в сравнении с покрытием $\text{Ti}_{0.5}\text{Al}_{0.5}\text{N}$. Было установлено, что покрытие, содержащее Si, обладает лучшей стойкостью к окислению при температурах 850 – 1000 °C за счет формирования дополнительной защитной оксидной пленки SiO_2 , а также эффекта сдерживания роста зерен. Vepreki др. [7] показали, что введение слоя Si_3N_4 в нанослойное покрытие $(\text{Al}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{N}-\text{Si}_3\text{N}_4$ позволяет защитить при температурах до 1100 °C метастабильный раствор fcc- $(\text{Al}_{1-x}\text{Ti}_x)$ от распада на fcc- $(\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x)\text{N}$ с высоким содержанием титана и вюрцитный h- (AlN) , что обычно приводит к снижению твердости и износостойкости. При этом, при отсутствии в составе покрытия Si_3N_4 описанные процессы происходят уже при температурах 800 °C. Carvalho др. [8] изучали свойства нанокомпозитного покрытия $(\text{Ti},\text{Si},\text{Al})\text{N}$. Исследованные покрытия обладали чрезвычайно высокой микротвердостью (до 50 GPa) и хорошей термостабильностью. Faгаи др. [9] исследовали режущие свойства инструмента с многослойным покрытием $(\text{Al},\text{Si},\text{Ti})\text{N}$, а также монокристаллическими покрытиями $(\text{Al},\text{Cr})\text{N}$ и $(\text{Al},\text{Ti})\text{N}$ при фрезеровании стали. Покрытие $(\text{Al},\text{Si},\text{Ti})\text{N}$ показало заметно более высокую теплостойкость и износостойкость при фрезеровании. Yui др. [10] рассматривали покрытия $(\text{Ti},\text{Al},\text{Si})\text{N}$ с различным содержанием Si. Введение Si в состав покрытия повышало микротвердость и адгезию с субстратом. Bouzakiset al [11] рассмотрели свойства покрытия $(\text{Ti},\text{Al},\text{Si})\text{N}$. Изучали влияние содержания Si на свойства покрытия. Было установлено, что покрытия с более высоким содержанием Si обладают большей прочностью и стойкостью при ударных испытаниях, а также – лучшим периодом стойкости при фрезеровании нержавеющей стали. Zhui др. [12] рассматривают покрытия $(\text{Ti},\text{Al},\text{Si})\text{N}$, содержащие 10 at.% Si и 0,4 и 0,35 at.% Al. Было установлено, что введение Si в состав покрытия приводит к формированию нанокомпозитной структуры $(\text{Ti},\text{Al},\text{Si})\text{N}-\text{Si}_3\text{N}_4$, при этом повышается микротвердость, но снижается прочность адгезии с субстратом. Покрытие с

большим содержанием Al более твердое, но при этом более хрупкое. Parlinska-Wojtan [13] исследовала диффузию кислорода в покрытие (Ti,Al,Si)N при температуре 1000°C. Исследуемое покрытие имело нанослойную структуру с чередованием слоев с повышенным содержанием Ti и повышенным содержанием Al и Si. После 1 часа выдержки при высокой температуре было обнаружено активное формирование на поверхности слоя оксидов Al_2O_3/TiO_2 . Была также зафиксирована активная диффузия Al в структуру оксидов и кислорода в структуру покрытия, причем в последнем случае наблюдалось формирование оксидов SiO_x на границах зерен. Fukumotoi др. [14] исследовали сопротивление окислению при температуре 800-1000 °C таких покрытий, как (Ti,Al,Si)N и нанослойного покрытия (Ti,Al,Si)N-(Cr,Al)N. Лучшее сопротивление окислению показало покрытие (Ti,Al,Si)N-(Cr,Al)N с $\lambda = 5.5$ нм. Причиной лучшей стойкости к окислению у покрытия с меньшей величиной λ является, по мнению авторов, увеличение количества межслойных границ и уменьшение размеров зерен, что препятствует диффузии кислорода в покрытие.

Таким образом, можно утверждать, что использование нанокомпозитной архитектуры покрытия, включающего в свой состав Al, Ti и Si, позволяет обеспечить дополнительное повышение стойкости и производительности металлорежущего инструмента.

Цель работы – исследование процессов изнашивания и диффузии на передней поверхности твердосплавных пластин с композиционным наноструктурированным покрытием Ti-TiN-(Ti,Al,Si)N.

Методика исследования свойств покрытия

Исследования механических свойств, микроструктуры и процесса изнашивания твердосплавных пластин с покрытием Ti-TiN-(Ti,Al,Si)N проводили в сравнении с монокристаллическим покрытием TiN толщиной 5 мкм.

Определение микротвердости проводили методом наноиндентирования на приборе InstronTukon(WilsonHardnessGroup, США) при величине нагружения 0,01 Н. Адгезионную прочность покрытий проводили с использованием скретч-тестера фирмы Nanovea (США), по стандарту ASTM C1624-05. Для микроструктурных исследований образцов использовали растровый электронный микроскоп Quanta 600 FEG(FEI, США) с системой микроанализа EDAXTridentXM 4. Для проведения исследований наноструктуры элементного состава покрытий использовался просвечивающий электронный микроскоп JEM 2100 (JEOL, Япония) высокого разрешения. Для анализа химического состава образцов использовались методы энерго-дисперсивной рентгеновской спектроскопии (EDXS), реализованные на оборудовании INCAEnergy (OxfordInstruments, Великобритания).

Покрытия осаждали на твердосплавные (WC+15%TiC+10%Co) неперетачиваемые пластины SNUN ISO 1832:2012. Исследования процессов

изнашивания и диффузии на передней поверхности твердосплавных пластин проводили при точении заготовок из стали AISI 1045 на токарном станке CU 500 MRD фирмы SLIVEN (Болгария) с бесступенчатым приводом ZMM CU500MRD. Процесс резания осуществляли без использования СОТС. Режимы обработки: $v_c = 250$ м/мин, $f = 0,25$ мм/об, $a_p = 1,0$ мм. В качестве критерия износа был принят износ по задней поверхности, равный 0.4 мм.

Методика осаждения покрытий

Покрытие осаждали на установке ВИТ-2 с использованием технологии Фильтруемого Катодного Вакуумно-Дугового Осаждения (FCVDO) [15-20].

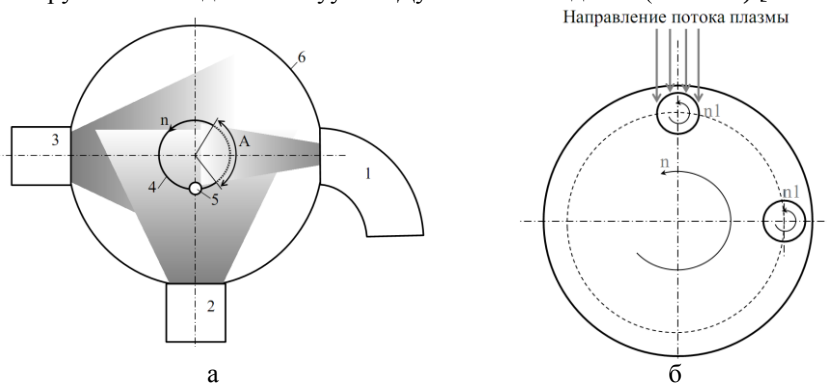


Рисунок 1. Схема осаждения многослойного покрытия на установке ВИТ-2

Использовали три источника плазмы (рис. 1, а): катод Al-Si устанавливали на источник с сепарацией паро-ионного потока 1, два катода Ti – в стандартные источники плазмы 2 и 3. Образец, закрепленный на оснастке 5, помещался на планетарном поворотном столе 4, вращающемся с частотой вращения n . Процесс осаждения происходил в вакуумной камере 6. Соответственно, при прохождении образцом области преимущественной конденсации компонентов распыляемых катодов, установленных на стандартных источниках, формировался более толстый нано слой, имеющий на СЭМ изображениях, как правило, более светлый цвет. При этом четкой дифференциации между областями преимущественной конденсации источников 2 и 3 не наблюдается. Можно предположить, что формируемый при этом нано слой обладает градиентной структурой с некоторым изменением процентного соотношения компонентов катода 2 и катода 3 по толщине данного нано слоя. Важно отметить, что Al, распыляемый источником 1, присутствует во всем объеме камеры, и, следовательно, в составе всех нанослоев покрытия. При прохождении области А образец оказывается в зоне прямого воздействия потока высокоэнергетической плазмы испарителя 1. В этот момент формируется нанослой, насыщенный алюминием (более тонкий нанослой, имеющий более темный цвет на СЭМ

изображениях). Перемещение образца, закрепленного на оснастке 5, между источниками плазмы с частотой n (рис. 1, а и б) формирует наноструктуру покрытия. Соответственно, за один полный оборот стола формируется бинарная система из нанослой большей толщины (с пониженным содержанием алюминия) и нанослой меньшей толщины (с большим содержанием алюминия). При этом граница данных слоев является градиентной, характеризуясь постепенным повышением/понижением содержания Al. В то же время образец, закрепленный на оснастке 5, совершает более сложное (планетарное) движение. Кроме вращательного движения вместе со столом 4, он совершает также вращательное движение вокруг оси оснастки (рис. 1, б), которое также влияет на формирование нано слоев покрытия. Так как при прохождении области А, в процессе формирования нанослой, оснастка с закрепленным образцом совершает несколько полных оборотов вокруг своей оси (рис. 1, б), структура нанослой будет также являться дискретной, включающей в себя несколько субнанослоев.

Результаты и обсуждение.

Установлено, что покрытие Ti-TiN-(Ti,Al,Si)N имеет микротвердость 32 ГПа и критическую нагрузку разрушения L_{C2} более 40 Н, что выше соответствующих показателей покрытия TiN, соответственно, 27 ГПа и 34 Н.

Элементный состав верхнего износостойкого слоя (Ti,Al,Si)N включает 76 ± 1 at% Ti; 18 ± 1 at% Al; 6 ± 2 at% Si.

Исследования микроструктуры покрытий показали, что покрытие TiN (рис. 2, а) имеет однослойную монолитную структуру, с выраженным столбчатым строением зерен. Покрытие Ti-TiN-(Ti,Al,Si)N (рис. 2, б) имеет трехслойную архитектуру, которая включает в себя адгезионный субслой Ti толщиной порядка 20 нм, переходный слой TiN толщиной около 1 мкм и наноструктурированный износостойкий слой (Ti,Al,Si)N общей толщиной порядка 4 мкм. Слой (Ti,Al,Si)N, в свою очередь, состоит из 38 бинарных нанослоев со средней толщиной $\lambda_b = 110$ нм. В связи с малой толщиной адгезионного субслоя он не заметен на SEM изображении, но хорошо различим на TEM изображении при большем увеличении съемки, (Рис. 2, с). Переходный слой TiN покрытия Ti-TiN-(Ti,Al,Si)N (Рис. 2) имеет столбчатую структуру, характерную для однослойных монолитных покрытий TiN. Нано слои (Ti,Al,Si)N также проходят через столбчатую структуру зерен, что хорошо видно при большем увеличении (область А на рис. 2). При этом, каждый нанослой (Ti,Al,Si)N также имеет слоистую структуру и состоит их субнанослоев (область В на рис. 3). При этом шаг данной слоистой структуры составляет 3 - 6 нм. Формирование слоистой структуры нанослой связано с вращательным движением образца вместе с оснасткой вокруг ее оси и одновременном вращении поворотного стола в процессе осаждения покрытия.

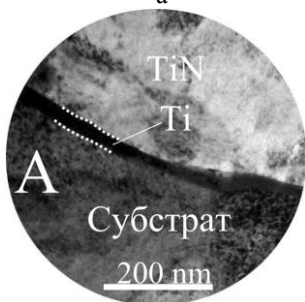
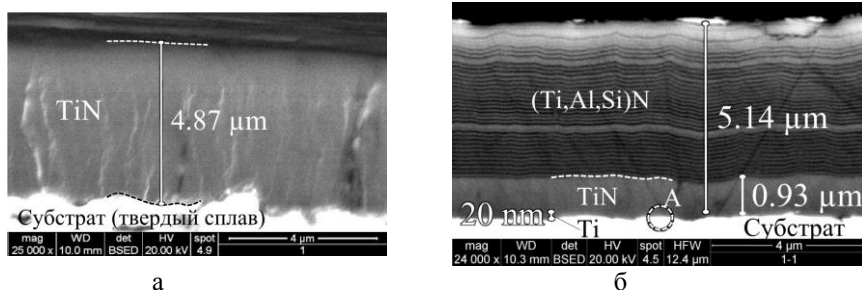


Рисунок 2. Микроструктура покриттів TiN (а), Ti-TiN-(Ti,Al,Si)N (б)(SEM) и адгезійний субслойTi (в) (TEM)

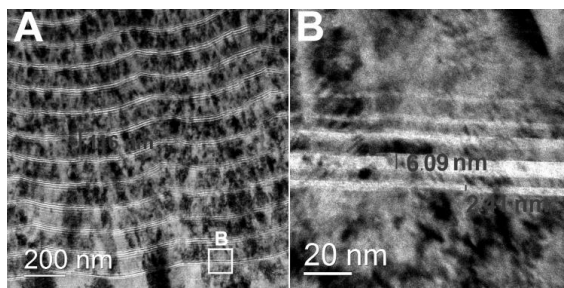
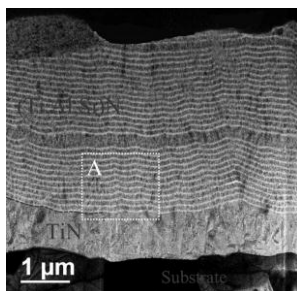


Рисунок 3. Наноструктура покриття Ti-TiN-(Ti,Al,Si)N (TEM)
Рассмотрим кристаллическую структуру износостойкого слоя (Ti,Al,Si)N и переходного слоя TiN (Рис. 4).

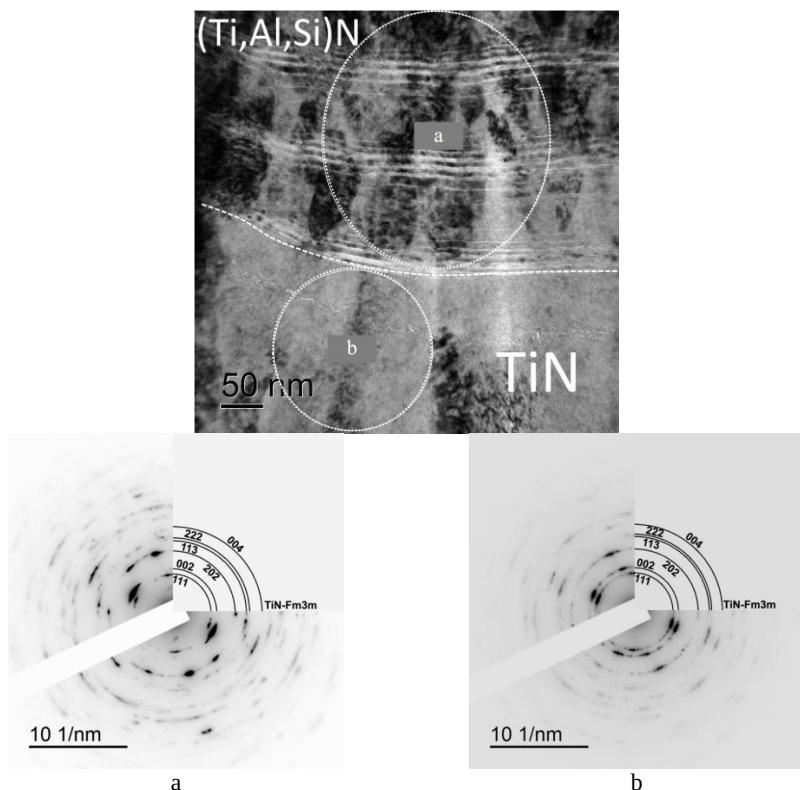


Рисунок 4. ТЕМ изображение слоев покрытия пленки $\text{Ti-TiN-(Ti,Al,Si)N}$. Область а – TiN , область б - $(\text{Ti,Al,Si)N}$. Электронограмма и б, с выделенных областей соответственно.

Так как кольца на электронограмме рис 4б замкнуты, то можно сделать вывод что, область б со слоистой структурой $(\text{Ti,Al,Si)N}$ состоит из кристаллических частиц меньшего размера, чем нижняя часть плёнки область а, слоя TiN (рис. 4а). Преимущественная ориентировка кристаллитов сохраняется по всей толщине пленки.

Результаты исследования режущих свойств инструмента с покрытием и характер его изнашивания.

Рассмотрим различия в характере изнашивания твердосплавных пластин с покрытиями после 35 минут резания. Следует отметить, что после указанного периода резания износ по задней поверхности пластин с покрытием TiN достиг предельного значения (0.4 мм), в то время, как для пластин с покрытием Ti-TiN-(Ti,Al,Si) он составил 0.24 мм.

Исследование изнашивания передней поверхности твердосплавных пластин с покрытиями проводили на поперечных шлифах, сделанных в плоскости, проходящей по центру лунки износа (Рис. 5). На шлифах были выделены области, представляющие интерес с точки зрения разрушения покрытия. На шлифах твердосплавных пластин с покрытием TiN (рис. 6, а) изучали область режущей кромки 1, внешнюю (дальнюю) границу лунки износа с покрытием 2 и область 3, характеризующуюся наличием сетки трещин.

На шлифах с покрытием Ti-TiN-(Ti,Al,Si) (рис. 5, б) рассматривали аналогичные области 1 и 2.

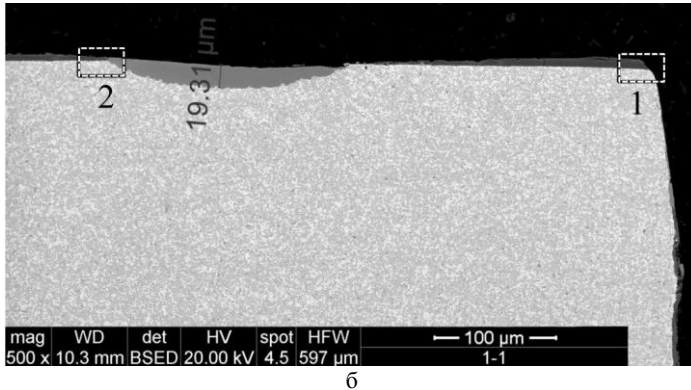
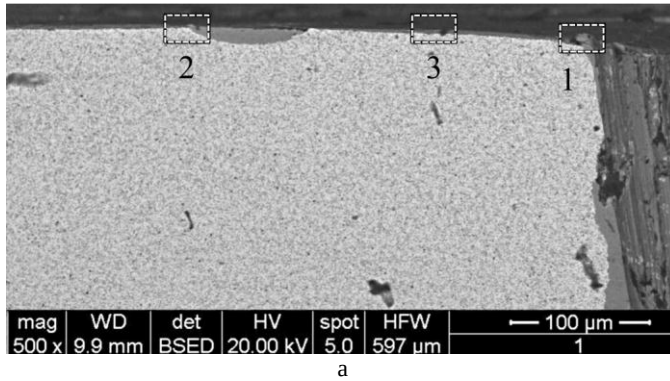


Рисунок 5. Поперечные шлифы твердосплавных пластин с покрытием TiN (а) и Ti-TiN-(Ti,Al,Si)N (б) (SEM)

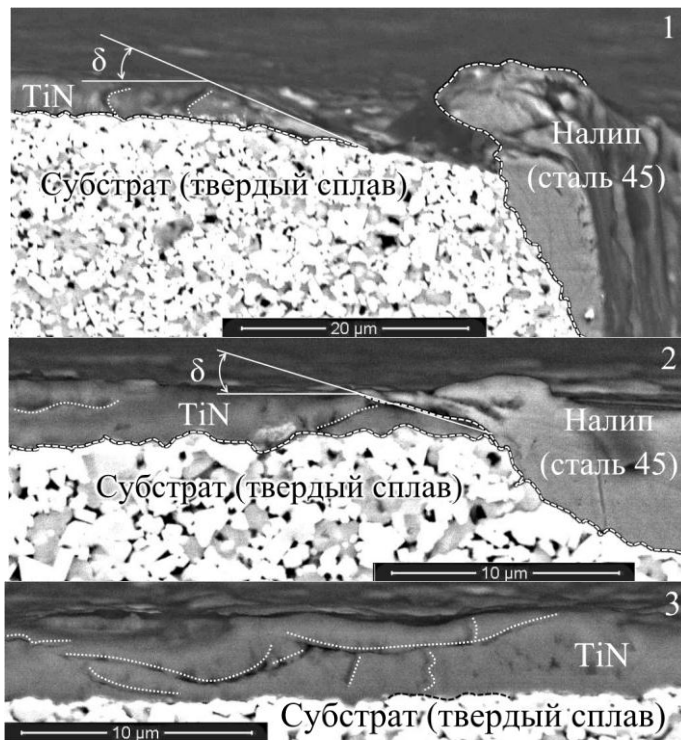


Рисунок 6. Характер изнашивания и разрушения контактной площадки на передней поверхности твердосплавных пластин с покрытием TiN (SEM)

Изучение областей изнашивания твердосплавных пластин с покрытием TiN позволяет отметить следующее. В области 1, прилегающей к режущей кромке (рис. 6.1), наблюдается абразивный износ, при этом угол δ стачивания покрытия относительно плоскости поверхности субстрата составляет порядка 15-20°. В данной области наблюдается налип обрабатываемого материала и присутствуют ряд поперечных трещин в покрытии. В области 2 внешней границы лунки износа (рис. 6.2) характер изнашивания покрытия близок к тому, что наблюдается у режущей кромки. Имеет место абразивный износ, возникающий за счет движения стружки, и угол стачивания δ также равен 15-20°. Кроме того, наблюдается ряд поперечных трещин и налип обрабатываемого материала в лунке износа. Наконец, в области 3 (рис. 6.3) можно видеть сетку продольных и поперечных трещин в структуре покрытия. Наряду с абразивным износом имеет место адгезионный износ, характеризующийся вырывом фрагментов покрытия с его поверхности и формированием протяженной продольной трещины (рис. 6.3). Кроме того, присутствуют элементы пластической деформации покрытия.

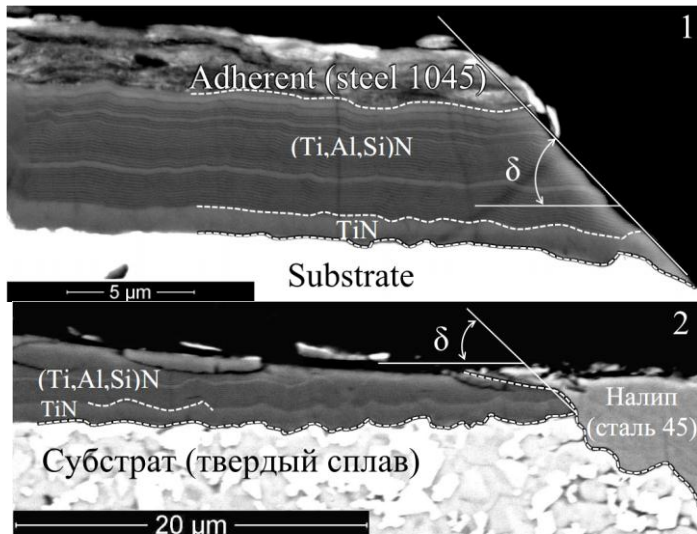


Рисунок 7. Характер изнашивания и разрушения контактной площадки на передней поверхности твердосплавных пластин с покрытием TiN-(Ti,Al,Si)N (SEM)

Для твердосплавных пластин с покрытием Ti-TiN-(Ti,Al,Si)N в характере изнашивания по сравнению с покрытием TiN имеются существенные отличия (рис. 7). Так, изнашивание покрытия в области 1 режущей кромки (рис. 7.1) характеризуется заметно большим значением угла δ , равным примерно 45° . Наблюдается абразивный износ с формированием достаточно ровной поверхностью истирания и обширный налип на поверхности покрытия. При этом покрытие сохраняет свою начальную толщину. В области 2 внешней границы лунки износа (рис. 7.2) наблюдаются признаки изнашивания, характерные как для абразивного, так и для адгезионного износа, которые проявляются в вырывах внешних элементов покрытия и формировании продольных деламинаций. Величина угла δ для данной области также близка к 45° .

Исследование диффузионных процессов

Известно, что диффузионные процессы играют важную роль в изнашивании режущего инструмента [21]. Однако исследования таких процессов часто затруднено в связи с малой толщиной (часто – нанометрической) диффузионного слоя. Ключевыми элементами диффузионных процессов при резании твердосплавным инструментом является диффузия вольфрама из твердого сплава в обрабатываемый материал и железа из обрабатываемого материала в твердый сплав [21,22]. Следствием данных процессов являются структурные изменения в поверхностных слоях твердого сплава, что отрицательно сказывается на его

работоспособности. Одной из важных функций покрытия является барьерная функция, приводящая к снижению интердиффузионных процессов [23].

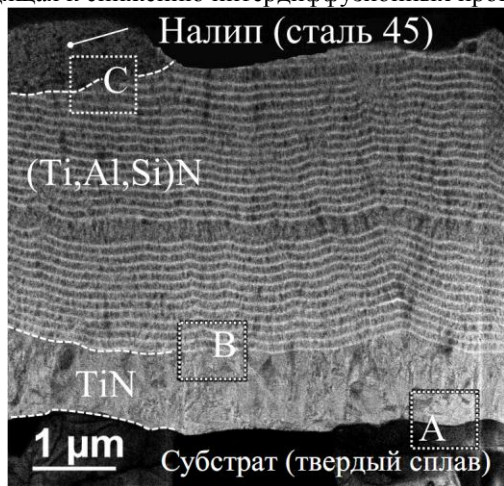


Рисунок 8. Области исследования диффузионных процессов в твердосплавных пластинах с покрытием Ti-TiN-(Ti,Al,Si)N (TEM изображение)

Диффузионные процессы в покрытии Ti-TiN-(Ti,Al,Si)N изучали в трех характерных зонах, представленных на рис. 8. Зона А – переходная зона между твердосплавным субстратом и внутренними слоями (адгезионным и переходным), в которой возможна диффузия вольфрама в покрытие. Зона В – переходная зона между слоями (Ti,Al,Si)N и TiN. В данной зоне в результате диффузионных процессов возможно изменение содержания таких элементов, как Al и Si. Зона С – переходная зона между налипом обрабатываемого материала и верхним износостойким слоем (Ti,Al,Si)N, в которой особый интерес представляет диффузия железа из обрабатываемого материала в покрытие.

В зоне А исследовали четыре области (1,2,3,4) (рис. 9), шаг между центрами которых составлял примерно 125 нм. Учитывая, что титан в данной зоне присутствует как в TiТвердого сплава, так и в микрокапляхTi и нитриде TiN в структуре покрытия, однозначно определить диффузию титана средствами данного метода не представляется возможным. Наличие же вольфрама во внутренних слоях покрытия может быть только результатом диффузионных процессов.

Исследования (рис. 9) показывают, что в области 1 зоны А отмечается высокое содержание Ti и W. В области 2, являющейся областью непосредственного перехода «субстрат – покрытие», судя по интенсивности пика EDXS, фиксируется незначительное повышение содержания титана по сравнению с областью 1, при этом содержание Wостается практически без

изменения. Наконец, в области 3, которая расположена в слое TiN покрытия, наблюдается резкое уменьшение содержания W, однако некоторое количество данного элемента все еще фиксируется, что позволяет говорить о диффузии вольфрама в покрытие на глубину, по крайней мере, 125 нм.

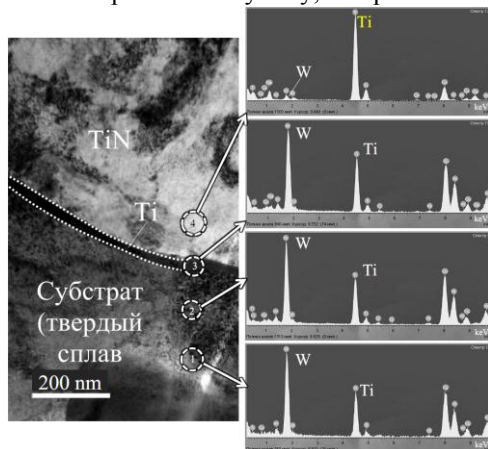


Рисунок 9. Содержание элементов в переходной зоне между твердосплавным субстратом и внутренними слоями покрытия (зона А)

В переходной зоне В (рис. 10) в областях (1) и (2) зафиксировано примерно одинаковое содержание титана, отсутствие Al и Si в области 1 и наличие данных элементов в области 2. Полученные данные свидетельствуют об отсутствии диффузии Al и Si через границу износостойкого (Ti,Al,Si)N и переходного TiN слоев покрытия.

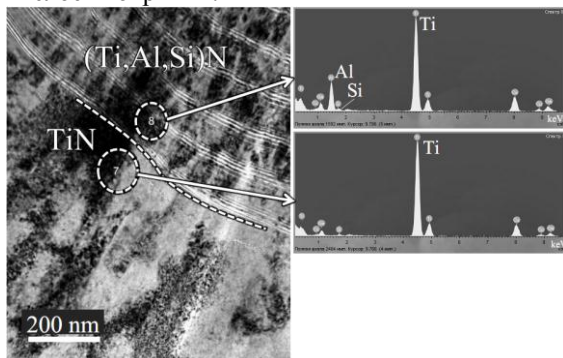


Рисунок 10. Содержание элементов в переходной зоне между слоями (Ti,Al,Si)N и TiN (зона В)

В зоне С в области 1 (рис. 11), центр которой расположен на расстоянии порядка 160 нм выше границы налива обрабатываемого материала с

износостойким слоем, основным элементом является железо. При этом, в данной области фиксируется крайне незначительное (в пределах 1 ат %) присутствие Ti. Учитывая, что титан не входит в состав стали 45, можно говорить о незначительной диффузии титана из износостойкого слоя (Ti,Al,Si)N в обрабатываемый материал. В области 2, центр которой находится ниже границы на расстоянии порядка 140 нм, наблюдается присутствие железа в количестве до 5 ат %. Фиксируется также наличие Ti, Al и Si, являющихся элементами состава покрытия. В области 3 зоны С, центр которой расположен еще ниже границы на расстоянии порядка 320 нм, присутствие Fe не фиксируется, а содержание Ti, Al и Si находится на уровне, характерном для области 2. Полученные данные свидетельствуют о наличии диффузии железа из обрабатываемого материала в покрытие на глубину не менее 140 нм и не более 320 нм.

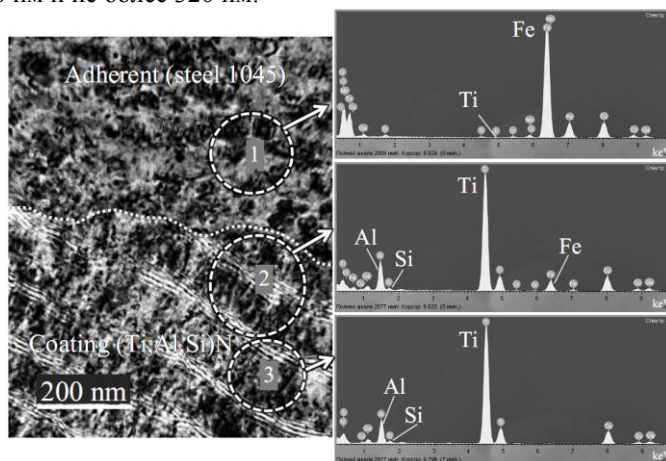


Рисунок 11. Содержание элементов в переходной зоне между износостойким слоем (Ti,Al,Si)N и налипком обрабатываемого материала (зона С)

Выводы

Определены микротвердость и критическая нагрузка разрушения, характеризующая прочность адгезии покрытия, величины которых составили соответственно 32 ГПа и более 40 Н, а также химический состав верхнего износостойкого слоя композиционного наноструктурированного покрытия Ti-TiN-(Ti,Al,Si)N.

Исследована микроструктура покрытия Ti-TiN-(Ti,Al,Si)N. Показано, что покрытие Ti-TiN-(Ti,Al,Si)N имеет трехслойную архитектуру, которая включает в себя адгезионный субслой Ti толщиной порядка 20 нм, переходный слой TiN толщиной около 1 мкм и наноструктурированный износостойкий слой (Ti,Al,Si)N общей толщиной порядка 4 мкм. Износостойкий слой (Ti,Al,Si)N, в свою очередь, состоит из 38 бинарных

нанослоев со средней толщиной бинарного слоя $\lambda_b = 110$ нм. Каждый нанослой также имеет слоистую структуру и состоит их субнанослоев, при этом шаг данной слоистой структуры λ составляет 3 - 6 нм.

Выявлен механизм формирования нанослоев и субнанослоев износостойкого слоя $(\text{Ti,Al,Si})\text{N}$, связанный с планетарным вращением образца в камере установки.

Установлено, что нанослойная структура покрытия позволяет сдерживать рост зерен в пределах нанометрического диапазона.

Выявлены более высокие режущие свойства твердосплавных пластин с покрытием $\text{Ti-TiN}-(\text{Ti,Al,Si})\text{N}$ по сравнению с покрытием TiN и особенности их изнашивания, разрушения и трещинообразования на различных участках передней поверхности инструмента.

Исследованы диффузионные процессы, установлено наличие заметной диффузии железа из обрабатываемого материала в покрытие на глубину не менее 140 нм, незначительная диффузия титана из покрытия в обрабатываемый материал и диффузия вольфрама из твердого сплава в покрытие на глубину 125 нм.

Список использованных источников: 1. G.S. Fox-Rabinovich, K. Yamamoto, S.C. Veldhuis, A.I. Kovalev, G.K. Dosbaeva Tribological adaptability of TiAlCrN PVD coatings under high performance dry machining conditions. *Surface & Coatings Technology*. 200(2005) 1804-13. 2. G.S. Fox-Rabinovich и др. Wear behavior of adaptive nano-multilayered TiAlCrN/NbN coatings under dry high performance machining conditions. *Surface & Coatings Technology* 202 (2008) 2015–2022. 3. G. Fox-Rabinovich и др. Evolution of self-organization in nano-structured PVD coatings under extreme tribological condition. *Applied Surface Science*. 297 (2014) 22–32. 4. C.-L. Liang и др. Fabrication and performance of TiN/TiAlN nanometer modulated coatings. *Thin Solid Films* 520(2011)813–817. 5. A. Rizzo и др. Improved properties of TiAlN coatings through the multilayer structure. *Surface & Coatings Technology* 235 (2013)475–483. 6. L.H. Zhu и др. High temperature oxidation behavior of $\text{Ti}_{0.5}\text{Al}_{0.5}\text{N}$ coating and $\text{Ti}_{0.5}\text{Al}_{0.4}\text{Si}_{0.1}\text{N}$ coating. *Vacuum* 2012;86:1795–9. 7. S.Veprek и др. Avoiding the high-temperature decomposition and softening of $(\text{Al}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{N}$ coatings by the formation of stable superhard $\text{nc}-(\text{Al}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{N/a-Si}_3\text{N}_4$ nanocomposite. *Mater Sci Eng A* 2004;366:202–5. 8. S. Carvalho и др. Microstructure and mechanical properties of nanocomposite $(\text{Ti,Si,Al})\text{N}$ coatings. *Thin Solid Films* 2001;398–399:391–6. 9. M.G. Faga и др. AlSiTiN nanocomposite coatings developed via Arc Cathodic PVD: evaluation of wear resistance via tribological analysis and high speed machining operations. *Wear* 2007;263:1306–14. 10. Yu.D.Wang и др. Microstructure and properties of TiAlSiN coatings prepared by hybrid PVD technology. *Thin Solid Films* 2009;517:4950–5. 11. K.-D. Bouzakis и др. Effect of silicon content on PVD film mechanical properties and cutting performance of coated cemented carbide inserts. *Surface & Coatings Technology* 237 (2013)379–389. 12. L. Zhu, C. Song, W. Ni, Y. Liu Effect of 10% Si addition on cathodic arc evaporated TiAlSiN coatings. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 26(2016) 1638–1646. 13. M. Parlinska-Wojtan Oxygen diffusion in columnar TiAlSiN coatings investigated by electron microscopy. *Thin Solid Films* 616 (2016) 437–443. 14. N. Fukumoto, H. Ezura, T. Suzuki Synthesis and oxidation resistance of TiAlSiN and multilayer TiAlSiN/CrAlN coating. *Surface & Coatings Technology* 204(2009) 902–906. 15. A. A. Vereschaka и др. Influence of nanolayer thickness on the performance properties of multilayer composite nano-structured modified coatings for metal-cutting tools. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* (2018) 95:2625–2640. 16. S.N. Grigoriev и др. Comparative analysis of cutting properties and nature of wear of carbide cutting tools with multi-layered nano-structured and gradient coatings produced by using of various deposition methods. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* (2017) 90:3421–3435. 17. A.A. Vereschaka и др. Nano-Scale Multi-Layered Coatings for Improved Efficiency of Ceramic Cutting Tools. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* (2017) 90:27–43. 18. A.A.

Vereschaka S.N. Grigoriev Study of cracking mechanisms in multilayer composite nano-structured coatings. *Wear*. 378-379 (2017) 43–57. doi:10.1016/j.wear.2017.01.101. 19. A.A. Vereschaka u dr. Delamination and longitudinal cracking in multi-layered composite nano-structured coatings and their influence on cutting tool life. *Wear*. 390–391 (2017) 209–219. 20. A. A. Vereschaka u dr. Working efficiency of cutting tools with multilayer nano-structured Ti-TiCN-(Ti,Al)CN and Ti-TiCN-(Ti,Al,Cr)CN coatings: Analysis of cutting properties, wear mechanism and diffusion processes. *Surface and Coatings Technology* 332 (2017) 198–213. 21. T.N. Loladze Nature of brittle failure of cutting tool. *Ann CIRP*. 1975; 24(1):13-16. 22. Лоладзе Т.Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента. – М.: Машиностроение, 1982. – 320 с. 23. Верещака А.С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями – М.: Машиностроение, 1993. 336 с.

Bibliography (transliterated): 1. G.S. Fox-Rabinovich, K. Yamamoto, S.C. Veldhuis, A.I. Kovalev, G.K. Dosbaeva Tribological adaptability of TiAlCrN PVD coatings under high performance dry machining conditions. *Surface & Coatings Technology*. 200(2005) 1804-13. 2. G.S. Fox-Rabinovich i dr. Wear behavior of adaptive nano-multilayered TiAlCrN/NbN coatings under dry high performance machining conditions. *Surface & Coatings Technology* 202 (2008) 2015–2022. 3. G. Fox-Rabinovich i dr. Evolution of self-organization in nano-structured PVD coatings under extreme tribological condition. *Applied Surface Science*. 297 (2014) 22–32. 4. C.-L. Liang i dr. Fabrication and performance of TiN/TiAlN nanometer modulated coatings. *Thin Solid Films* 520(2011)813–817. 5. A. Rizzo i dr. Improved properties of TiAlN coatings through the multilayer structure. *Surface & Coatings Technology* 235 (2013)475–483. 6. L.H. Zhu i dr. High temperature oxidation behavior of Ti0.5Al0.5N coating and Ti0.5Al0.4Si0.1N coating. *Vacuum* 2012;86:1795–9. 7. S.Veprek i dr. Avoiding the high-temperature decomposition and softening of (Al_{1-x}Ti_x)N coatings by the formation of stable superhardnc-(Al_{1-x}Ti_x)N/a-Si₃N₄nanocomposite. *Mater SciEng A* 2004;366:202–5. 8. S. Carvalho i dr. Microstructure and mechanical properties of nanocomposite (Ti,Si,Al)N coatings. *Thin Solid Films* 2001;398–399:391–6. 9. M.G. Faga i dr. AlSiTiNnanocomposite coatings developed via Arc Cathodic PVD: evaluation of wear resistance via tribological analysis and high speed machining operations. *Wear* 2007;263:1306–14. 10. Yu.D.Wang i dr. Microstructure and properties of TiAlSiN coatings prepared by hybrid PVD technology. *Thin Solid Films* 2009;517:4950–5. 11. K.-D. Bouzakis i dr. Effect of silicon content on PVD film mechanical properties and cutting performance of coated cemented carbide inserts. *Surface & Coatings Technology* 237 (2013)379–389. 12. L. Zhu, C. Song, W. Ni, Y. Liu Effect of 10% Si addition on cathodic arc evaporated TiAlSiN coatings. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 26(2016) 1638–1646. 13. M. Parlinska-Wojtan Oxygen diffusion in columnar TiAlSiN coatings investigated by electron microscopy. *Thin Solid Films* 616 (2016) 437–443. 14. N. Fukumoto, H. Ezura, T. Suzuki Synthesis and oxidation resistance of TiAlSiN and multilayer TiAlSiN/CrAlN coating. *Surface & Coatings Technology* 204(2009) 902–906. 15. A. A. Vereschaka i dr. Influence of nanolayer thickness on the performance properties of multilayer composite nano-structured modified coatings for metal-cutting tools. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* (2018) 95:2625–2640. 16. S.N. Grigoriev i dr. Comparative analysis of cutting properties and nature of wear of carbide cutting tools with multi-layered nano-structured and gradient coatings produced by using of various deposition methods. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* (2017) 90:3421–3435. 17. A.A. Vereschaka i dr. Nano-Scale Multi-Layered Coatings for Improved Efficiency of Ceramic Cutting Tools. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* (2017) 90:27–43. 18. A.A. Vereschaka S.N. Grigoriev Study of cracking mechanisms in multilayer composite nano-structured coatings. *Wear*. 378-379 (2017) 43–57. doi:10.1016/j.wear.2017.01.101. 19. A.A. Vereschaka i dr. Delamination and longitudinal cracking in multi-layered composite nano-structured coatings and their influence on cutting tool life. *Wear*. 390–391 (2017) 209–219. 20. A. A. Vereschaka i dr. Working efficiency of cutting tools with multilayer nano-structured Ti-TiCN-(Ti,Al)CN and Ti-TiCN-(Ti,Al,Cr)CN coatings: Analysis of cutting properties, wear mechanism and diffusion processes. *Surface and Coatings Technology* 332 (2017) 198–213. 21. T.N. Loladze Nature of brittle failure of cutting tool. *Ann CIRP*. 1975; 24(1):13-16. 22. Loladze T.N. Prochnost i iznosostojkost rezhushhego instrumenta. – М.: Mashinostroenie, 1982. – 320 s. 23. Vereshaka A.S. Rabotosposobnost rezhushhego instrumenta s iznosostojkimi pokrytyiyami – М.: Mashinostroenie, 1993. 336 s.

Надійшла до редакції 25.06.2018

УДК 621.7

Я.Н. Гаращенко, канд. техн. наук, Харьков, Украина

ВОЗМОЖНОСТИ ВИЗУАЛЬНОГО И СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ОЦЕНКИ ПРИМЕНИМОСТИ ДЕКОМПОЗИЦИИ ИЗДЕЛИЯ ПРИ ЕГО ПОСЛОЙНОМ ИЗГОТОВЛЕНИИ

Представлено результати дослідження можливостей візуальної оцінки ефективності застосування структурної зворотної декомпозиції на основі аналізу розподілу елементарних об'ємів (воксельної 3D-моделі) виробу за підпросторами, одержуваним шляхом розбиття робочого простору. Апробація візуальної оцінки і статистичного аналізу розподілу елементарних об'ємів здійснювалось з використанням моделей промислових виробів.

Ключевые слова: аддитивные технологии, технологическая подготовка, воксельная модель, структурная обратимая декомпозиция

Представлены результаты исследования возможностей визуальной оценки эффективности применения структурной обратимой декомпозиции на основе анализа распределения элементарных объемов (воксельной 3D-модели) изделия по подпространствам, получаемым путем разбиения рабочего пространства. Апробация визуальной оценки и статистического анализа распределения элементарных объемов выполнялась с использованием моделей промышленных изделий.

Ключові слова: адитивні технології, технологічна підготовка, воксельного модель, структурна оборотна декомпозиція

The results of a study of the possibilities of visual evaluation of effectiveness of structural reversible decomposition based on analysis of the distribution of elementary volumes (voxel 3D-model) of product on subspaces obtained by dividing the workspace are presented. Testing of visual evaluation and statistical analysis of the distribution of elementary volumes was performed using industrial product models.

Keywords: additive technologies, technological preparation, voxel model, structural reversible decomposition

Введение. На первоначальном этапе конструкторской и технологической подготовки представляет интерес оценка приспособленности конструкции к эффективной реализации оптимизационных задач. Одной из основных задач технологической подготовки аддитивного производства является структурная обратимая декомпозиция изделия [1]. Как правило, структурную декомпозицию используют для крупногабаритных изделий, размеры которых превышают размеры платформы установки [2]. Решение данной задачи позволяет достаточно существенно уменьшить время изготовления и увеличить удельный используемый объем рабочего пространства установки [3].

Анализ последних исследований и публикаций. Структурная декомпозиция изделия, как правило, является первой задачей, выполняемой при технологической подготовке, так как определяет геометрические и

технологические ограничения для последующих задач (последовательность решаемых задач представлена на рис. 1).

Работа [4] является одной из первых решавших задачу рационального использования рабочего пространства путем декомпозиции изделия. При этом триангуляционная модель переводилась в растровое (воксельное) представление.



Рисунок 1 – Задачи технологической подготовки к материализации изделия аддитивными технологиями

Декомпозицию изделия выполняют различными способами рассечения 3D-модели. В работах [3, 5, 6] рассечение модели осуществляется плоскостями по выбранному критерию. В работах [2, 3] – время формообразования, в [5, 6] – площадь контакта с поддерживающими структурами, а также в [5] – объем поддерживающих структур.

Достаточно распространено выполнение декомпозиции с образованием частей изделия с минимальной сложностью геометрической формы поверхностей [7–10]. Такие методы построены на основе кластерного анализа триангуляционной модели [7, 8] или сочетания кластерного и спектрального анализа по набору морфометрических характеристик [9]. В работе [10] разбиение на части изделия осуществлялось на основе оценки кривизны поверхности по ориентации ребер триангуляционной модели.

Наполнение рабочего пространства установки в форме параллелепипеда будет наибольшим при размещении частей изделия такой же формы. Поэтому в ряде работ [8, 11–13] декомпозицию изделия выполняют с использованием параллелепипедов или призм с заданными размерами. Но такой подход имеет ограничения в применении для тонкостенных изделий [13].

Одним из направлений исследований, направленных на повышение эффективности оценки технологичности, совершенствование конструкции и стратегии изготовления аддитивными технологиями является развитие инструментов визуального анализа исследуемых признаков [14].

В качестве наиболее представительного исследуемого признака 3D модели для визуального (цветового) анализа было выбрано распределение элементарных объемов изделия в рабочем пространстве установки. Данный исследуемый признак является наиболее значимым из геометрических свойств конструкции, т.к. определяет наполняемость рабочего пространства размещаемыми изделиями.

В данной работе сделано предположение, что визуальный и статистический анализ пространственного распределения элементарных объемов изделия позволит выполнять предварительную оценку эффективности его декомпозиции. Использование воксельной модели предоставляет возможности для анализа пространственного распределения элементарных объемов (вокселей материала) изделия.

Целью работы является изучение возможностей визуального и статистического анализа объемного распределения материала изделия (на основе анализа воксельной 3D-модели) для оценки его влияния на используемый удельный объем рабочего пространства установки аддитивных технологий.

Подсистема статистического анализа воксельной 3D-модели изделия. Исследование выполнялось с использованием подсистемы создания и статистического анализа воксельной 3D-модели изделия. Данная подсистема входит в систему технологической подготовки материализации сложных изделий аддитивными технологиями, разработанной на кафедре "Интегрированные технологии машиностроения" НТУ "Харьковский политехнический институт" (Украина). Данная система позволяет выполнять оценку технологичности конструкции и эффективности решения задач технологической подготовки аддитивного производства на основе

статистического анализа исследуемых признаков полигональной, воксельной и послойной модели изделия.

Экранные формы разработанной подсистемы создания и анализа воксельной 3D-модели представлены на рис. 2–4.

Разработанная подсистема представляет пользователю следующие основные возможности задания параметров и режимов работы с последующей визуализацией результатов:

- создание воксельной 3D-модели изделия на основе полигональной (STL-файла) с учетом размеров вокселей $\square_x$, $\square_y$, $\square_z$ (рис. 2);
- сохранение воксельной модели в файл формата ASC для анализа в сторонних программах (CAD-системах);
- статистический анализ и построение гистограмм распределения вокселей 3D-модели по осям X, Y, Z (рис. 3) и по подпространствам рабочего пространства (рис. 4);
- определение основных статистических характеристик (12 параметров выводятся на экранную форму, показанную на рис. 3);
- вывод формы визуализации результатов анализа в виде плотности или интегральной функции вероятности.

Возможность вывода статистических характеристик и гистограмм распределения количества вокселей по осям X, Y, Z (рис. 3) позволяет количественно и визуально оценивать особенности распределения материала.

Предварительный анализ 3D-модели

Создание воксельной 3D-модели

Сохранение воксельной 3D-модели в ASC-файл

Проверка адекватности воксельной 3D-модели

Отклонения воксельной от триангуляционной 3D-модели

Структура: Обратная декомпозиция

Открыть STL | Импорт STL в БД | Создание воксельной модели | Анализ воксельной модели

Исх. данные | Создание воксельной модели | Сохранить файл ASC | Проверка | Сохранить модель | Открыть модель

Вопрос: (пока не обработана воксельная модель);

Количество вокселей модели: 23696
Количество вокселей свободного пространства: 29224
Расчетное количество вокселей (общее): 48748
Размеры вокселя (по осям X, Y, Z): 2; 2; 2
Объем воксельной модели: 189568 (мм³)
Время создания: 4 704 мс.
Площадь триангуляционной модели: 43 283,847 mm²
Объем триангуляционной модели: 196 096,000 mm³
Объем воксельной модели: 189 568,000 mm³
Погрешность создания воксельной модели по объему: -3,3%.
Коэффициент заполнения объема: 44,8%.
Время проверки: 41 мс.

Исходные данные

	Ось X, мм	Ось Y, мм	Ось Z, мм
Мин.	0.00	-42.92	-42.92
Макс.	60.00	42.92	42.92
Размеры	60.00	85.85	85.85
Воксель	☒ 2.00	☒ 2.00	☒ 2.00
Расчетное количество вокселей:	48 748		

Воксельная модель

	Ось X, мм	Ось Y, мм	Ось Z, мм
Мин.	1.00 / 0.00	-41.92 / -42.92	-41.92 / -42.92
Макс.	59.00 / 60.00	40.08 / 41.08	40.08 / 41.08
Размеры	58.00 / 60.00	82.00 / 84.00	82.00 / 84.00
Отклонения	0.00 мм / 0.0 %	1.85 мм / 2.2 %	1.85 мм / 2.2 %
Количество/объем вокселей:	23 696 / 189 568.00		

Выполнена проверка модели.

Рисунок 2 – Экранная форма подсистемы создания воксельной модели

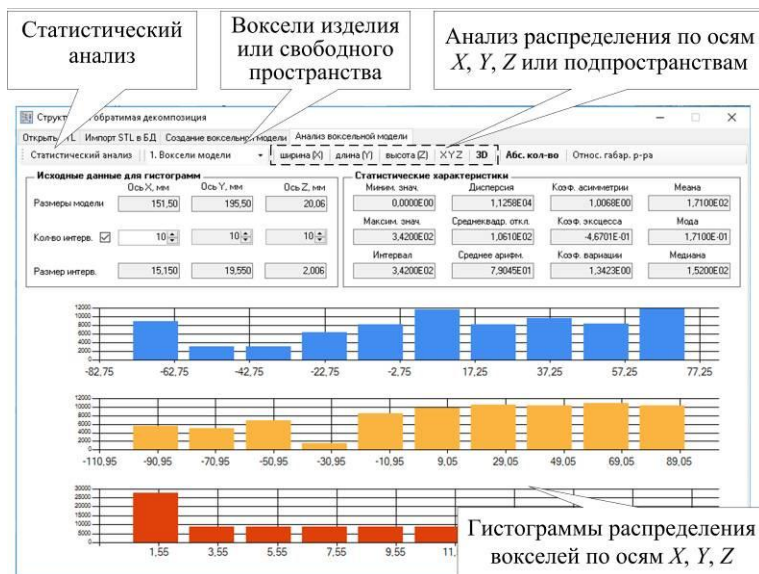


Рисунок 3 – Экранная форма статистического анализа распределения вокселей (материала изделия и свободного рабочего пространства) по осям X, Y, Z

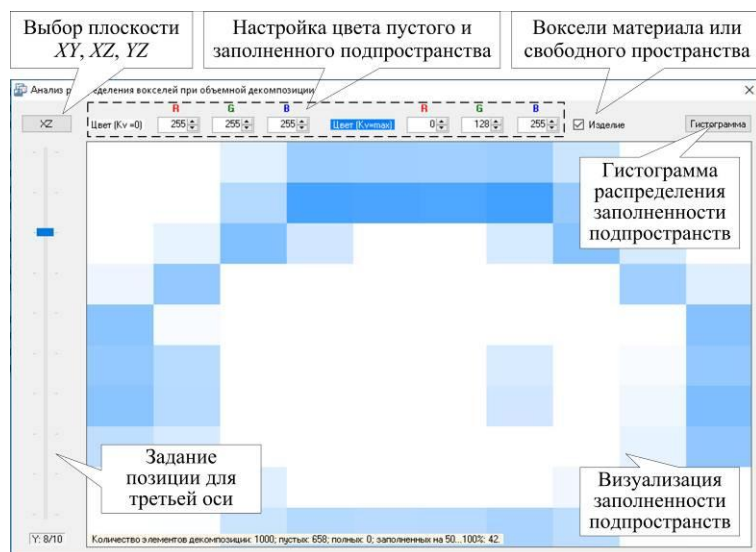


Рисунок 4 – Визуализация распределения относительного количества вокселей по подпространствам

Рассмотрение рабочего пространства в виде совокупности подпространств дает возможность оценивать пространственное распределение материала. Предусмотренный статистический анализ (рис. 3) с визуализацией распределения вокселей по подпространствам (рис. 4) позволяет оценивать их наполненность материалом изделия. Реализация такого подхода создает основу для обоснованного применения декомпозиции.

Анализ пространственного распределения материала изделий. Исследование возможностей визуальной оценки применимости структурной обратимой декомпозиции выполнялось на примере небольшого ряда моделей промышленных изделий представленных на рис. 5.

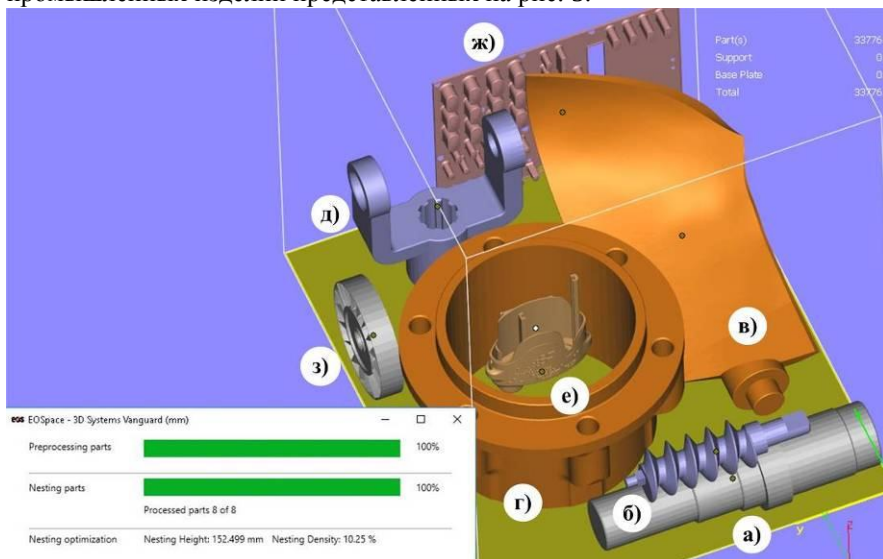


Рисунок 5 – Тестовые модели промышленных изделий:
а – вал; б – шнек; в – лопасть; г – корпус; д – карданный вал;
е – крышка; ж – панель; з – вентилятор

Визуальный и статистический анализ распределения элементарных объемов (материала) изделия в пространстве выполнялось на основе анализа воксельной модели. Алгоритм анализа включал следующие действия:

- формирование воксельной модели рабочего пространства на базе триангуляционной 3D-модели исходя из размеров вокселей $v_u(\square_x, \square_y, \square_z)$ и габаритных размеров изделия $U_{ws}(L_{part}, W_{part}, H_{part})$ или рабочего пространства послойного построения установки $U_{ws}(L_x, L_y, H_z)$;

- формирование подпространств U_i с учетом заданного количества разбиений пространства U_{ws} по каждой из координатных осей X, Y, Z ;

– анализ распределения материала изделия (относительного количества вокселей материала K_{Vi}) по частям разбиения (подпространствам U_i) рабочего пространства U_{ws} (рис. 4, 6).

Первым действием формируется воксельная модель рабочего пространства U_{ws} . Такая модель представляет собой множество вокселей $U_{ws} = \{v_{u1}, v_{u2}, \dots, v_{un}\}$ с координатами по осям X, Y, Z . Воксельная модель U_{ws} включает воксели материала изделия $P = \{v_{u1}, v_{u2}, \dots, v_{un}\}$ и свободного пространства (без материала) $F = \{v_{u1}, v_{u2}, \dots, v_{un}\}$, т. е. $P \in U_{ws}$, $F \in U_{ws}$ при условиях $P \cup F = U_{ws}$ и $P \cap F = \emptyset$.

Последующее действие путем разбиения рабочего пространства U_{ws} формирует подпространства $U_1, U_2, \dots, U_i \in U_{ws}$ с обеспечением условий:

$$U_1 \cup U_2 \cup \dots \cup U_i = U_{ws};$$

$$U_1 \cap U_2 \cap \dots \cap U_i = \emptyset.$$

Определение принадлежащих подпространствам U_i вокселей материала $P_i \in P$ и свободного пространства $F_i \in F$ с обеспечением условий:

$$P_i \cup F_i = U_i; \quad P_1 \cup P_2 \cup \dots \cup P_i = P; \quad F_1 \cap F_2 \cap \dots \cap F_i = F.$$

Апробация алгоритма выполнялась на тестовых моделях промышленных изделий, представленных на рис. 5. Гистограммы распределения материала по подпространствам U_i , создавались на примере тестовых моделей (при формировании 10^3 подпространств). В общем, при исследовании рабочее пространство разбивалось на $N_p = 3^3 - 10^3$ подпространств (3–10 частей по каждой координатной оси). Такое количество N_p является достаточным с учетом выявленных ограничений N_D (табл. 1) и необходимым для выявления подпространств, не имеющих вокселей материала ($P_i \in \emptyset$). Также принято допущение – разбиение на подпространства выполнять относительно собственных габаритных размеров изделия. Такой подход позволяет получать результаты исследования независимо от габаритных размеров рабочей платформы выбранной установки.

На рис. 6 представлены гистограммы распределения относительной наполненности материалом подпространств на примерах тестовых изделий. В случае вала (рис. 6) наблюдается существенно большее количество подпространств с минимальным $K_{Vi} \in [0, 0.1]$ и наибольшим $K_{Vi} \in [0.9, 1]$ наполнением.

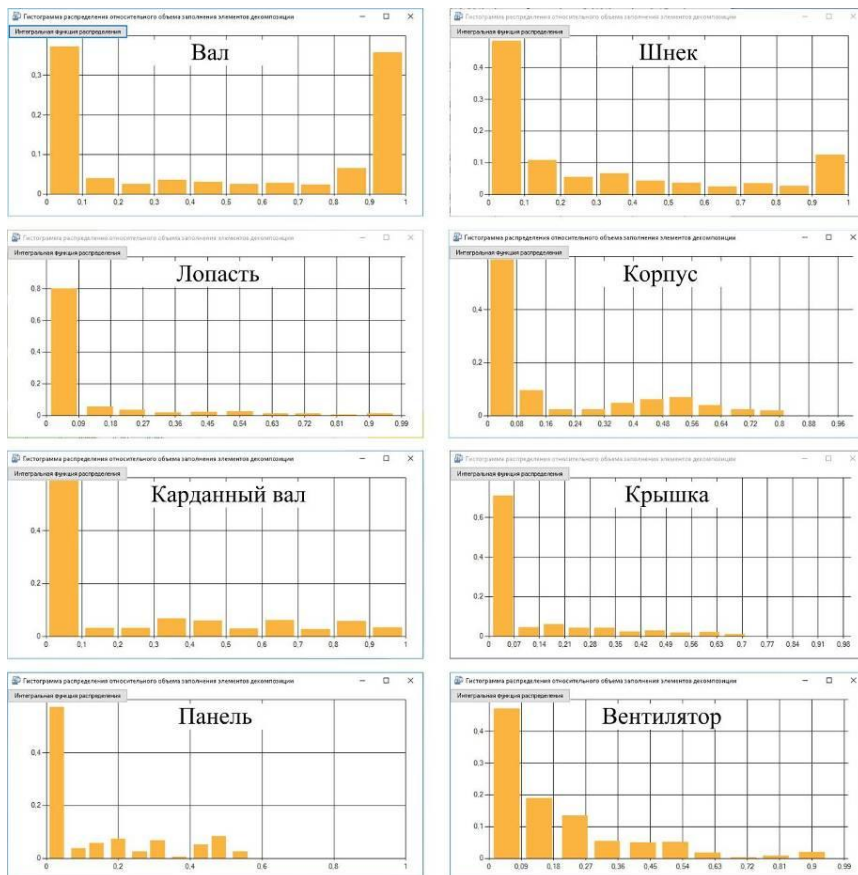


Рисунок 6 – Гистограммы распределения относительного содержания материала тестовых изделий по подпространствам

В случае корпуса наблюдается более половины подпространств (58 %) с минимальным наполнением $K_{Vi} \in [0, 0.1)$. Для вентилятора 46 % подпространств имеют наполненность материалом изделия $K_{Vi} \in [0, 0.1)$. Отличительным признаком от вала и корпуса является достаточно большое количество (32 %) подпространств с наполнением $K_{Vi} \in [0.1, 0.3)$.

Представленные результаты статистического анализа распределения элементарных объемов изделий по подпространствам демонстрируют достаточную информативность для предварительной оценки целесообразности применения структурной обратимой декомпозиции изделий получаемых послойным построением.

Выводы по результатам исследования. В разработанной подсистеме создания и статистического анализа воксельной 3D-модели изделия встроено инструменты статистического анализа для исследования распределения элементов воксельной модели изделия по подпространствам принадлежащим рабочему пространству установки. Предлагается для количественной оценки пространственного распределения вокселей – основные статистические характеристики. Для визуального анализа – цветовая визуализация наполненности подпространств материалом (относительного количества вокселей изделия) и гистограммы плотности (или интегральной функции) вероятности распределения исследуемого признака.

На основе результатов статистического анализа воксельной модели изделия представляется возможным выявление показателей прогнозируемой эффективности применения структурной обратимой декомпозиции. Такие показатели представляют интерес для принятия обоснованного решения по рациональному применению декомпозиции для максимизации удельного используемого объема рабочего пространства установки аддитивных технологий.

Список использованных источников: 1. Gogate A. Intelligent layout planning for rapid prototyping [Текст] / A.S. Gogate, S.S. Pande // Int J Prod Res. — 2008. — 46(20). — P. 5607—5631. 2. Sung-Min H. Determination of fabricating orientation and packing in SLS process [Текст] / H. Sung-Min, C. Kyung-Hyun, L. Seok-Hee, C. Pok-Keun // Journal of Materials Processing Technology. — 2001. — Vol. 112, Issues 2–3. — P. 236—243. 3. Витязев Ю.Б. Расширение технологических возможностей ускоренного формообразования способом стереолитографии [Текст]: Дис... канд. техн. наук / Ю. Б. Витязев. — Харьков, 2004. — 228 с. 4. Han, G.C. New approach for nesting problem using part decomposition technology [Текст] / G.C. Han, S.K. Kim // IEEE Xplore Conference: Industrial Electronics, Control and Instrumentation, 1997. 23rd International Conference on. — 1997. — Vol. 3. — P. 1234—1239. 5. Ilinkin I. A decomposition-based approach to layered manufacturing [Текст] / I. Ilinkin, R. Janardan, J. Majhi, J. Schwerdt, M. Smid, R. Sriram // Computational Geometry. — 2002. — Vol. 23, Issue 2. — P. 117—151. 6. Yu E.A. Evolutionary decomposition for 3D printing / E.A. Yu, J. Yeom, C.C. Tutum, E. Vouga, R. Miikkulainen // In Proceedings of GECCO'17, Berlin, Germany, July 15-19. — 2017. — P. 1272—1279. 7. Vanek J. PackMerger: a 3D print volume optimizer [Текст] / J. Vanek, J. Garcia, B. Benes, R. Mech, N. Carr, O. Stava, G. Miller // Computer Graphics Forum 33, 6. — 2014. — P. 322—332. 8. Ruizhen Hu. Approximate pyramidal shape decomposition [Текст] / Hu Ruizhen, Li Honghua, Zhang Hao, Cohen-Or. Daniel // A CMTrans on Graph 33, 6. — 2014. — P. 12. 9. Shamir, A. A survey on mesh segmentation techniques [Текст] / A. Shamir // Computer Graphics. Forum 27, 6. — 2008. — P. 1539—1556. 10. Hao J. An efficient curvature-based partitioning of large-scale STL models [Текст] / J. Hao, L. Fang, R. Williams // Rapid Prototyping Journal. — 2011. — 17, 2. — P. 116—127. 11. Luo L. Chopper: Partitioning Models into 3D-Printable parts [Текст] / L. Luo, I. Baran, S. Rusinkiewicz, W. Matusik // ACM Transactions on Graphics. — 31(6). — 2012. — 9 p. 12. 3D (three-dimensional) printing-oriented model decomposition and arrangement method [Текст]: пат. 105427374 China: MIK B33Y50/02, G06T17/00 / Chen Xuelin, Lyu Lin, Chen Baoquan. — № CN20151762458; заявл. 10.11.2015; опубл. 23.03.2016. 13. Xuelin C. Dapper: decompose-and-pack for 3D printing [Текст] / Chen, Xuelin et al. // Acm transactions on graphics. — 2015. — vol. 34, no. 6, 4. — 12 p. 14. Barnawal, Prashant. Design and evaluation of feedback system in design for manufacturability [Текст]. Graduate Theses and Dissertations. 14789. — 2015. <http://lib.dr.iastate.edu/etd/14789>.

- Bibliography (transliterated):** 1. Gogate A. Intelligent layout planning for rapid prototyping [Текст] / A.S. Gogate, S.S. Pande // *Int J Prod Res.* — 2008. — 46(20). — P. 5607—5631. 2. Sung-Min H. Determination of fabricating orientation and packing in SLS process [Текст] / H. Sung-Min, C. Kyung-Hyun, L. Seok-Hee, C. Pok-Keun // *Journal of Materials Processing Technology.* — 2001. — Vol. 112, Issues 2–3. — P. 236—243. 3. Vitjazez Ju.B. Rasshirenie tehnologicheskikh vozmozhnostej uskorennoogo formoobrazovanija sposobom stereolitografii [Текст]: Dis... kand. tehn. nauk / Ju.B. Vitjazez. — Har'kov, 2004. — 228 s. 4. Han, G.C. New approach for nesting problem using part decomposition technology [Текст] / G.C. Han, S.K. Kim // *IEEE Xplore Conference: Industrial Electronics, Control and Instrumentation, 1997. 23rd International Conference on.* — 1997. — Vol. 3. — P. 1234—1239. 5. Ilinkin I. A decomposition-based approach to layered manufacturing [Текст] / I. Ilinkin, R. Janardan, J. Majhi, J. Schwerdt, M. Smid, R. Sriram // *Computational Geometry.* — 2002. — Vol. 23, Issue 2. — P. 117—151. 6. Yu E.A. Evolutionary decomposition for 3D printing / E.A. Yu, J. Yeom, C.C. Tutum, E. Vouga, R. Miikkulainen // *In Proceedings of GECCO'17, Berlin, Germany, July 15-19.* — 2017. — P. 1272—1279. 7. Vanek J. PackMerger: a 3D print volume optimizer [Текст] / J. Vanek, J. Garcia, B. Benes, R. Mech, N. Carr, O. Stava, G. Miller // *Computer Graphics Forum* 33, 6. — 2014. — P. 322—332. 8. Ruizhen Hu. Approximate pyramidal shape decomposition [Текст] / Hu Ruizhen, Li Honghua, Zhang Hao, Cohen-Or. Daniel // *A CMTrans on Graph* 33, 6. — 2014. — P. 12. 9. Shamir, A. A survey on mesh segmentation techniques [Текст] / A. Shamir // *Computer Graphics. Forum* 27, 6. — 2008. — P. 1539—1556. 10. Hao J. An efficient curvature-based partitioning of large-scale STL models [Текст] / J. Hao, L. Fang, R. Williams // *Rapid Prototyping Journal.* — 2011. — 17, 2. — P. 116—127. 11. Luo L. Chopper: Partitioning Models into 3D-Printable parts [Текст] / L. Luo, I. Baran, S. Rusinkiewicz, W. Matusik // *ACM Transactions on Graphics.* — 31(6). — 2012. — 9 p. 12. 3D (three-dimensional) printing-oriented model decomposition and arrangement method [Текст]: Пат. 105427374 Chine: МПК B33Y50/02, G06T17/00 / Chen Xuelin, Lyu Lin, Chen Baoquan. — № CN20151762458; заявл. 10.11.2015; опубл. 23.03.2016. 13. Xuelin C. Dapper: decompose-and-pack for 3D printing [Текст] / Chen, Xuelin et al. // *Acm transactions on graphics.* — 2015. — vol. 34, no. 6, 4. — 12 p. 14. Barnawal, Prashant. Design and evaluation of feedback system in design for manufacturability [Текст]. Graduate Theses and Dissertations. 14789. — 2015. — <http://lib.dr.iastate.edu/etd/14789>.

Надійшла до редколегії 25.06.2018

УДК 621.9.+ 621.6

В.С. Гусарев, канд. техн.наук, В.Б. Наддачин, канд. техн.наук,
Одесса, Украина

СТРУКТУРНАЯ СХЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО МОНТАЖА

Стаття визначає методологію процесу аналізу структури процесу та автоматичної системи монтажу. Метод ілюстровано прикладом монтажу комплекту вала з підшипниками у корпус. Метод є корисним на початкових етапах проектування монтажних систем.

Ключові слова: *структурна схема, автоматична система монтажу, складання вала*

В статті изложена методика анализа структуры процесса и автоматической системы монтажа изделий. Метод иллюстрирован примером сборки вала с двумя подшипниками с корпусом. Метод полезно использовать на начальных стадиях проектирования систем.

Ключевые слова: *структурная схема, автоматическая система монтажа, сборка вала*

The article sets out the methodology of the analysis of the structure of the process and automatic mounting. The method is illustrated with an example of an Assembly with two shaft bearings. Method is useful in the initial stages of systems design

Keywords: *block diagram, automatic assembly system, shaft assembly*

Сборка — заключительный этап изготовления машины, в значительной степени определяющий ее эксплуатационные качества. Трудоёмкость сборочных работ в машиностроении составляет примерно 20-70% от общей трудоёмкости изготовления машин. Средняя трудоёмкость сборочных работ изделий в настоящее время составляет в США и ФРГ 40%, в Англии, Франции и Италии 50%, в КНР доходит до 70% от всей трудоёмкости машины. На машиностроительных заводах из всего объема сборочных работ автоматизировано только 15-20%, совсем малую часть занимают сборочно-монтажные и монтажные операции.

Монтаж - это автоматическая сборка, которая выполняется из стандартных деталей (например, подшипников) и отдельных блоков (узлов), предварительно изготовленных, иногда такие блоки называют комплектующими изделиями. Монтаж, т.е. автоматизация сборочных процессов, повышает производительность труда рабочих, улучшает условия их работы, сокращает число рабочих-сборщиков, повышает качество продукции, уменьшает удельную площадь цеха под сборку, снижает себестоимость выпускаемой продукции.

Задача создания автоматических систем для сборки (машинно-ручной процесс) и монтажа (машинный процесс) требует использования новых методов проектирования на основе структурного моделирования. Метод состоит из двух частей: первый известный – переработка конструкции на «технологичность» для осуществления автоматического монтажа, и второй самомоделирование структуры процесса и оборудования.

Первая часть: изделия, предназначенные для автоматической сборки, должны удовлетворять требованиям технологичности:

- Простотой конструкции и способностью обеспечивать легкость соединения элементов сборки.
- Полной взаимозаменяемостью сборочных единиц.
- Расчлененностью на законченные взаимозаменяемые сборочные единицы и соединения, которые должны обеспечивать удобство подвода сборочных приспособлений, захвата, перемещения, монтажа.
- Максимальная унификация и нормализация сборочных единиц и минимальное количество деталей, входящих в сборочную единицу.

Вторая часть - содержит решение задач структурного моделирования технологических процессов сборки (сопряжения деталей), требует установления связей между структурой объекта изготовления (изделия) и структурой оборудования, на котором реализуется технологические процессы сборки изделия.

Сложность поставленной задачи состоит в том, что при построении моделей необходимо выбирать их элементы, исходя из законов проектирования технологических процессов, которые отражены в технологии машиностроения.

Для решения конкретной задачи технологического проектирования (конструкции изделия, технологический процесс изготовления, разработка программы сборки) необходима своя модель, отражающая особенности объекта проектирования. Для моделирования автоматического оборудования предлагается рассматривать набор сборочных единиц, как первичный элемент процесса, в котором комбинация их в изделие предписывает определенную комбинацию сборочных операций процесса монтажа. Модель оборудования представлена элементами, комбинирующие простейшие операции, которые должны выполняться в одно или два транспортно-установочное движение. Рассмотрим процесс структурного моделирования на примере сборки вала с двумя подшипниками и разъемным корпусом.

Проектирование схем сборок, технологического процесса, структуры оборудования и алгоритмов функционирования.

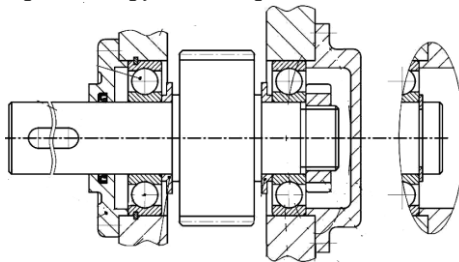


Рисунок 1. Вал-шестерня с 2-мя подшипниками

Приведем пример применения метода структурного моделирования процесса, оборудования и алгоритма функционирования. Покажем, как

ведется проектирование по всем этапам сборки вала и двух подшипников в корпусе.

Этап 1. Технологичность конструкции и кодирование.

В данном изделии есть резьбовое соединение, позволяющее закрепить подшипник. Для автоматической сборки это соединение не допустимо, поэтому требуется замена его на стопорное кольцо.

Кодирование изделия начнем с вала, обозначив его a_1 . Все элементы, относящиеся к нему, следует обозначить через a_i . Это две втулки a_2 и a_3 , и стопорное кольцо a_4 . Подшипники обозначим, как $(ab)_1$ и $(ab)_2$. Элементы, относящиеся к корпусу, обозначены через b_i . Корпус разъемный из двух частей. Основание b_1 , крышка корпуса b_2 и две крышки для подшипников b_3 и b_4 . Вносим обозначения всех элементов на чертеж.

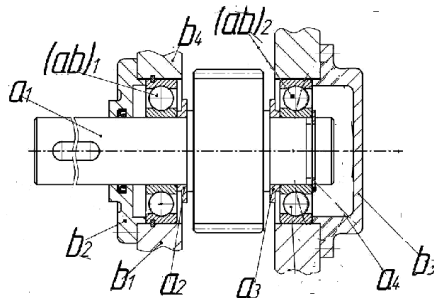


Рисунок 2. Вал- шестерня с 2-мя подшипниками технологично скорректированная конструкция для автоматического монтажа

Этап 2. Составление матрицы изделия

Первый столбец - элементы, которые относятся к валу. Это вал a_1 с двумя кольцами a_2 и a_3 , и также стопорное кольцо a_4 . Второй - подшипники $(ab)_1$ и $(ab)_2$. Третий - все элементы, которые сопрягаются с корпусом. Это сам корпус b_1 , крышка корпуса b_2 и две крышки подшипников b_3 и b_4 .

Аналогично составляется матрица технологических операций монтажа. Матрицы имеют вид:

$$\begin{matrix} \text{Матрица изделия} & & \text{Матрица ТОП} \\ \begin{bmatrix} a_1 & (ab)_1 & b_1 \\ a_2 & (ab)_2 & b_2 \\ a_3 & 0 & b_3 \\ a_4 & 0 & b_4 \end{bmatrix} & \Rightarrow & \begin{bmatrix} A_1 & (AB)_1 & B_1 \\ A_2 & (AB)_2 & B_2 \\ A_3 & 0 & B_3 \\ A_4 & 0 & B_4 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Этап 3. Возможные варианты маршрута сборки и графы процессов

Рассмотрим два варианта из возможных процессов сборки.

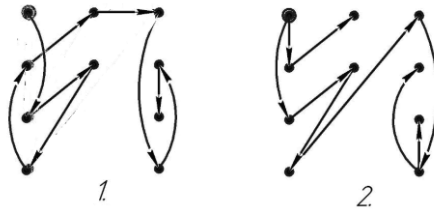


Рисунок 3. Графы вариантов технологического процесса автоматизированного монтажа. Граф 1 - последовательный монтаж, 2 - параллельный монтаж с двух сторон.

Сборка (1 вариант). Первая операция подача $U(a_1)$ вала A_1 . Вторая – устанавливается на вал кольцо a_3 . Третья - напрессовываются подшипник $(ab)_2$, затем закрепляется стопорным кольцом a_4 . Устанавливается кольцо a_2 и затем подшипник $(ab)_1$. На операции выполняется установка вала (в сборе) в основание корпуса b_1 . Далее ставится крышка корпуса b_4 . На последней - сборка завершается одновременной установкой крышек подшипников b_2 и b_3 .

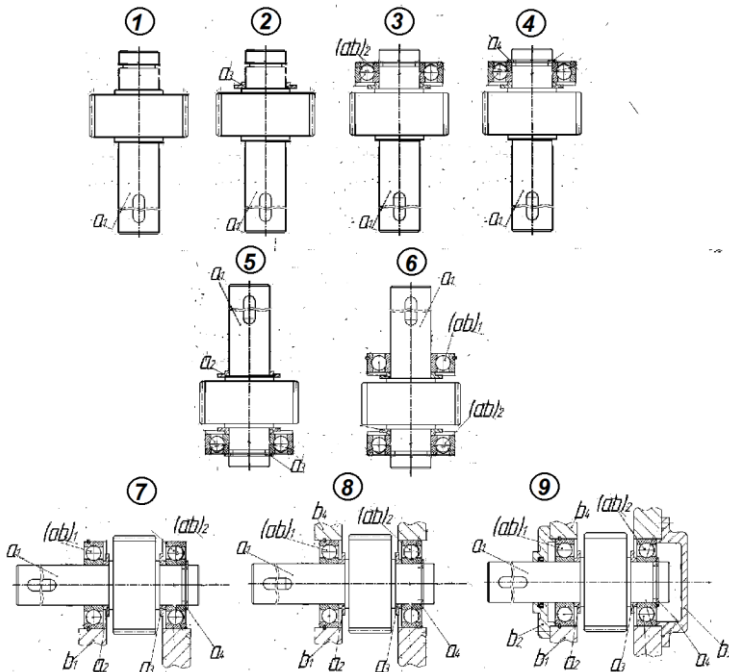


Рисунок 4. Эскиз операций процесс монтажа (1 вариант)

Сборка изделия (2 вариант). Начинается процесс с подачи вала $U(a_1)$ - первая операция A_1 . На второй операции одновременно с двух сторон устанавливается кольцо a_2 и кольцо a_3 . В третьей - напрессовываются одновременно с двух сторон подшипник $(ab)_1$ и подшипник $(ab)_2$, затем фиксируют подшипник стопорным кольцом a_4 . На четвертой операции - выполняется установка вала в корпус b_1 . На пятой устанавливается крышка b_4 корпуса. На шестой, сборка завершается одновременной установкой крышек подшипников b_2 и b_3 .

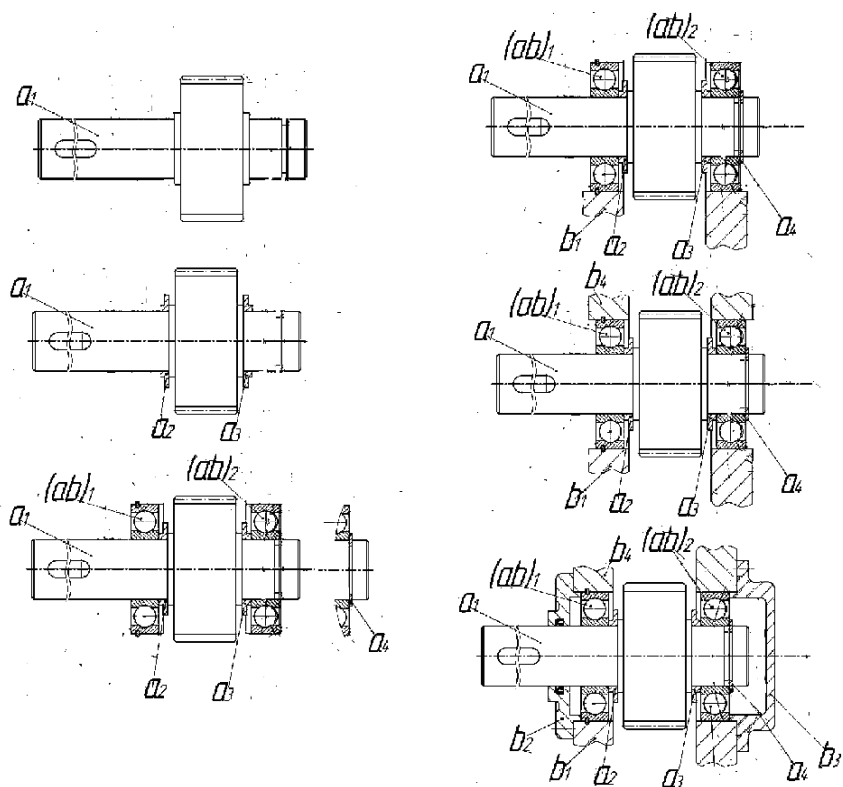


Рисунок 5. Эскиз операций процесс монтажа (2 вариант)

Этап 4. Распределение технологических операций по позициям

Исходя из конструкции изделия и графов технологической сборки, распределим операции сборки по ячейкам технологического оборудования. Для этого составим графы технологического маршрута и распределим технологические операции автоматического монтажа по позициям системы. Первый вариант монтажа реализован системой, составленной из двух участков: первый с кольцевым транспортером, а второй с линейным. Положение изделия в системе комбинированное: на первом участке вертикальное, на втором горизонтальное. Второй вариант системы выполняется с использованием линейного конвейера. Положение изделия в системе горизонтальное.

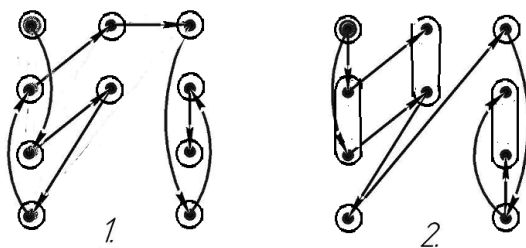


Рисунок 6. Распределение ТОП по техническим средствам: 1- одиночные монтажные агрегаты, 2 - сдвоенные машинные агрегаты

Этап 5. Структурная схема автоматической системы (линии)

Схема структуры построена на основе последовательного принципа монтажа с применением кольцевого транспортера перемещения по позициям P_γ первого участка и линейного на втором участке подающих деталей P_α .

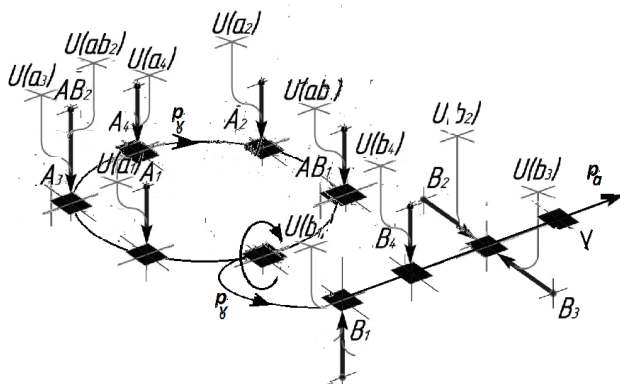


Рисунок 7. Структурная модель системы, последовательная схема (1 вариант)

Структурная схема автоматической монтажной системы представляет собой автоматическую линию, по обе стороны которой располагаются механизмы подачи и установки деталей на базовую деталь вал.

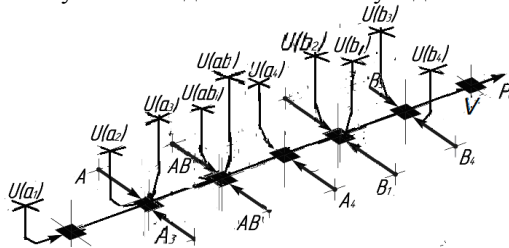


Рис. 8 Структурная модель системы, параллельная схема (2 вариант)

Этап 6. Алгоритм функционирования системы оборудования

Алгоритм функционирования автоматической монтажной системы (1 вариант).

$$\left(\frac{U(a)_1}{A_1} \right) p_{a_1} \left(\frac{U(a)_2}{A_2} \right) p_{a_2} \left(\frac{U(ab)_1}{AB_1} \right) p_{ab_1} \left(\frac{U(a)_3}{A_3} \right) p_{a_3} \left(\frac{U(a)_4}{A_4} \right) p_{a_4} \left(\frac{U(a)_5}{A_5} \right) p_{a_5} \left(\frac{U(ab)_2}{AB_2} \right) p_{ab_2} \left(\frac{U(b)_1}{B_1} \right) p_{b_1} \left(\frac{U(b)_2}{B_2} \right) p_{b_2} \left(\frac{U(b)_3}{B_3} \right) p_{b_3} \left(\frac{U(b)_4}{B_4} \right) p_{b_4} V$$

Алгоритм функционирования автоматической монтажной системы (2 вариант).

$$\left(\frac{U(a)_1}{A_1} \right) p_{a_1} \left(\frac{U(a)_2}{A_2} \right) p_{a_2} \left(\frac{U(a)_3}{A_3} \right) p_{a_3} \left(\frac{U(ab)_1}{AB_1} \right) p_{ab_1} \left(\frac{U(ab)_2}{AB_2} \right) p_{ab_2} \left(\frac{U(b)_1}{B_1} \right) p_{b_1} \left(\frac{U(b)_2}{B_2} \right) p_{b_2} \left(\frac{U(b)_3}{B_3} \right) p_{b_3} \left(\frac{U(b)_4}{B_4} \right) p_{b_4} V$$

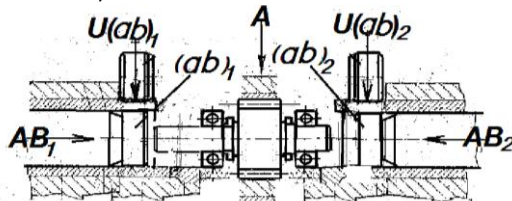


Рисунок 9. Позиция (фрагмент) запрессовки подшипников (2 вариант)

Этап 7. Определение длительности цикла автоматического монтажа

Операционная длительность определяется согласно правилу

τ -преобразования:

для последовательности

$$\tau \left(\frac{U(a_{\square})}{A_{\square}} \right)_{\square} = \tau U(a_{\square}) + \tau A_{\square}$$

для одновременности

$$\tau \left(\frac{U(a_{\square})}{A_{\square}} \cdot \frac{U(b_{\square})}{B_{\square}} \right)_{\square} = \begin{cases} \tau \left(\frac{U(a_{\square})}{A_{\square}} \right), & \text{если } \tau \left(\frac{U(a_{\square})}{A_{\square}} \right) \geq \tau \left(\frac{U(b_{\square})}{B_{\square}} \right) \\ \tau \left(\frac{U(b_{\square})}{B_{\square}} \right), & \text{если } \tau \left(\frac{U(a_{\square})}{A_{\square}} \right) \leq \tau \left(\frac{U(b_{\square})}{B_{\square}} \right) \end{cases}$$

Расчет ведется по каждой позиции системы для выявления лимитирующей, которая определяет временной интервал выпуска изделия, т.е. длительность цикла. Для упрощения расчета примем условно 1 операционное действие (ОД) равно 1 единицы времени (ЕВ).

1. Вариант

Рассмотрим первый вариант работы системы по позициям: для первой позиции:

$$\tau U(a_1)p_a = \tau U(a_1) + \tau p_a = 1 + 1 = 2 \text{ ЕВ};$$

для второй позиции: четвертой

$$\tau \left(\frac{U(a)_3}{A_3} \circ \frac{U(ab)_2}{AB_2} \right) p_{a_3} = \tau' U(a)_3 + \tau A_3 + \tau U(ab)_2 + \tau AB_2 + \tau p_{a_3} = 5 \text{ ЕВ}$$

для третьей позиции аналогично

$$\tau \left(\frac{U(b_1)}{B_1} \right) p_a = \tau U(b_1) + \tau B_1 + \tau p_a = 1 + 1 + 1 = 3 \text{ ЕВ}$$

для четвертой, для пятой, шестой и седьмой позиции

$$\tau \left(\frac{U(b_1)}{B_1} \right) p_a = \tau U(b_1) + \tau B_1 + \tau p_a = 1 + 1 + 1 = 3 \text{ ЕВ}$$

для восьмой позиции: $\tau V = 1 \text{ ЕВ}$

Поскольку операции на каждой позиции выполняются одновременно, общая позиция с лимитирующей длительностью вторая и третья. Их цикл одинаков и равен наибольшему времени. В нашем случае длительность цикла будет равна времени сборки на третьей позиции: $\tau_c = 5 \text{ ЕВ}$

2. Вариант.

для первой позиции:

$$\tau U(a_1)p_a = \tau U(a_1) + \tau p_a = 1 + 1 = 2 \text{ ЕВ};$$

для второй, третьей, пятой и шестой позиций время одинаково:

$$\tau \left(\frac{U(a)_2}{A_2} \circ \frac{U(a)_3}{A_3} \right) p_{a_3} = \tau' U(a) + \tau A + \tau p_{a_3} = 3 \text{ ЕВ}$$

для четвертой позиции

$$\tau \left(\frac{U(b_1)}{B_1} \right) p_a = \tau U(b_1) + \tau B_1 + \tau p_a = 1 + 1 + 1 = 3 \text{ ЕВ}$$

для седьмой позиции: $\tau V = 1 \text{ ЕВ}$

Поскольку операции на каждой позиции выполняются одновременно, длительность цикла будет равна наибольшему времени на одной позиции. В нашем случае длительность цикла будет равна времени сборки на второй позиции: $\tau_c = 3 \text{ ЕВ}$

Этап 8. Техническая характеристика автоматической системы.

1. Для первого варианта

- Число сборочных позиций $E = 10$.
- Число потоков $F = 1$.
- Число механизмов $G = 23$.

- Число движений $H = 33$.
- Длительность цикла $\tau_c = 5 \text{ EB}$.

Продуктивность оборудования находим по формуле:

$$П = 60 \frac{F}{\tau_c} = 60 \frac{1}{5} = 12 \frac{\text{шт}}{\text{мин}}$$

где F - число потоков сборки,

τ_c - время цикла.

- Производительность:

2. Для второго варианта

Запишем итоговую характеристику сборочного автомата:

- Число сборочных позиций $E = 7$.
- Число потоков $F = 1$.
- Число механизмов $G = 21$.
- Число движений $H = 26$.
- Длительность цикла $\tau_c = 3 \text{ EB}$.
- Продуктивность:

$$П = 60 \frac{F}{\tau_c} = 60 \frac{1}{3} = 20 \frac{\text{шт}}{\text{мин}}$$

Этап 9. Решение

Для дальнейшего проектирования принимается вариант 2, т.к. он имеет более высокую продуктивность и наименьшие характеристики.

Список использованных источников: 1. Гусарев В.С., Ковальчук Е.Н. Структурная модель сборки деталей в конструкции. 20 –я Международная научно – практическая конференция «Физические и компьютерные технологии» (23-24 декабря 2014 г.) Харьков, «Лира.», с. 28 - 33. 2. Гусарев В.С., Ковальчук Е.Н., Наддачин В.Б. Автоматическая сборка массовых изделий / Седьмая Международная научно-техническая конференция /«Информационные технологии в промышленности». - ИТИ*2012, 30–31 октября 2012 года, Минск, с. 71 - 72. 3. Гусарев В.С., Ковальчук Е.Н. Построение сборочно-монтажного оборудования по модульному принципу. /Седьмая Международная научно-техническая конференция /«Информационные технологии в промышленности». - ИТИ*2012, 30–31 октября 2012 года, Минск, с. 193 – 194.

Bibliography (transliterated): 1. Gusarev V.S., Kovalchuk E.N. Strukturnaya model sborki detalej v konstrukcii. 20 –ya Mezhdunarodnaya nauchno – prakticheskaya konferenciya «Fizicheskie i kompyuternye tehnologii» (23-24 dekabrya 2014 g.) Harkov, «Lira.», s. 28 - 33. 2. Gusarev V.S., Kovalchuk E.N., Naddachin V.B. Avtomaticheskaya sborka massovykh izdelij / Sedmaya Mezhdunarodnaya nauchno-tehnicheskaya konferenciya /«Infomacionnye tehnologii v promyshlennosti». - ITI*2012, 30–31 oktyabrya 2012 goda, Minsk, s. 71 - 72. 3. Gusarev V.S., Kovalchuk E.N. Postroenie sborочно-montazhnogo oborudovaniya po modulnomu principu. /Sedmaya Mezhdunarodnaya nauchno-tehnicheskaya konferenciya /«Infomacionnye tehnologii v promyshlennosti». - ITI*2012, 30–31 oktyabrya 2012 goda, Minsk, s. 193 – 194.

Надійшла до редколегії 25.06.2018

УДК 621.7/9+929

Ю.Г. Гуцаленко, Харьков, Украина

АЛМАЗНО-ИСКРОВОЕ ШЛИФОВАНИЕ: ОБЗОР ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ И ПРОМЫШЛЕННОЙ ПРАКТИКИ РАЗРАБОТКИ ХАРЬКОВСКОЙ НАУЧНОЙ ШКОЛЫ ФИЗИКИ ПРОЦЕССОВ РЕЗАНИЯ И ИНТЕГРИРОВАННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Наведено стислий опис сорокап'ятиріччя розробки технологій, верстатів та інструментів алмазно-іскрового шліфування, яку було ініційовано у Харківському політехнічному інституті колективом науковців на чолі з М.Ф. Семко і М.К. Беззубенко. Представлено дані про напрямки і результати дослідницької практики та впровадження розробки у виробництво. Виконаний огляд звернень в історію науки і техніки та разом з тим привертає увагу до сучасно конкурентного і перспективного методу алмазно-абразивної обробки.

Ключові слова: машинобудування, важкооброблювані матеріали, стійкість круга, електричний розряд, алмазно-іскрове шліфування, продуктивність, якість обробки, технологічна надійність, експлуатаційна довговічність

Приведено краткое описание сорокапятилетия разработки технологий, станков и инструментов алмазно-искрового шлифования, которую было инициировано в Харьковском политехническом институте коллективом ученых под руководством М.Ф. Семко и Н.К. Беззубенко. Представлены данные о направлениях и результатах исследовательской практики и внедрения разработки в производство. Выполненный обзор обращен в историю науки и техники и вместе с тем привлекает внимание к современно конкурентному и перспективному методу алмазно-абразивной обработки.

Ключевые слова: машиностроение, труднообрабатываемые материалы, стойкость круга, электрический разряд, алмазно-искровое шлифование, производительность, качество обработки, технологическая надежность, эксплуатационная долговечность.

Considered description of forty-five years of diamond-spark grinding technology, machines and tools development that was initiated at Kharkov Polytechnic Institute by collective of scientists at the head of M.F. Semko and N.K. Bezzubenko is given. The information about directions and results of research development and application to production is presented. The completed review turns into the history of science and technology and at the same time draws attention to the modern competitive and promising method of diamond-abrasive processing.

Keywords: mechanical engineering, hard-to-work materials, circle stability, electric discharge, diamond-spark grinding, productivity, processing quality, technological reliability, operational durability.

Научно-техническое соперничество СССР и США, в особенности бурное развитие обеими сверхдержавами во второй половине XX века ракетно-космического материаловедения, стимулировало появление в мировой практике новых высокопрочных и высокотвёрдых, термо- и износостойких труднообрабатываемых материалов. Обострение комплекса проблем производительности, качества и стабильности механической обработки побудило к разработке новых технологических подходов, объединению

известных технических решений в поиске принципиально новых результатов функционирования станков и инструментов.

М.Ф. Семко, ученика профессора Н.И. Резникова в предвоенной истории и заведующего кафедрой резания металлов и металлорежущих инструментов, ректора Харьковского политехнического института в его более чем тридцатилетнее послевоенное время, всегда отличала способность верной оценки перспектив развития науки и практики резания материалов, основанная на глубочайшем профессиональном интеллекте. После создания в СССР первых синтетических алмазов и организации их промышленного производства – с начала 60-х годов – он концентрирует усилия руководимого им коллектива на разработке физических основ резания инструментами из сверхтвердых материалов, посвящает этой проблематике вводную статью в первом выпуске организованного им республиканского межведомственного научно-технического сборника «Станки и режущие инструменты» [1], ныне известного как «Резание и инструмент в технологических системах», последовательно определяет направления исследований и создает научную школу алмазной обработки материалов.

Именно такой – Алмазная обработка материалов – он видит приоритетную серию выпусков сборника и так называет ее начиная с первого, потом четвертого, потом седьмого... По сути провидчески заострив работу наследия учителя-предшественника – научной школы физики процессов резания – на стратегическом направлении развития механической обработки и обеспечивающей это развитие технологической науки. При самом непосредственном организующем и деятельном участии Н.К. Беззубенко, ученика М.Ф. Семко, одним из заметных результатов этой работы и стала приоритетная разработка метода алмазно-искрового шлифования – принципиально нового метода абразивной обработки инструментами из сверхтвердых материалов [2-6].

Сущность метода заключается в том, что в зону резания целенаправленно вводится энергия в форме электрических импульсов определенной мощности, формы, продолжительности и частоты, в том числе с дополнительным наложением ультразвуковых колебаний. Работа проводится в среде простых, безвредных и экологически чистых смазывающе-охлаждающих жидкостей.

На первом этапе разработки, в 70-е годы, были заложены начала научных и технологических основ этого метода. Непререкаемый научный авторитет М.Ф. Семко, энтузиазм и профессиональная компетентность Н.К. Беззубенко, их талант образовывать вокруг себя и своего дела круг увлеченных единомышленников, позволили объединить в этой разработке усилия специалистов нескольких кафедр и лабораторий Харьковского политехнического института, добиться в 1976 – 1979 гг. принятия решений ГКНТ СССР по развитию разработки в государственном масштабе. Именно

такого масштаба были личности М.Ф. Семко и Н.К. Беззубенко, учёных и просветителей. Несомненной их заслугой в научно-практическом продвижении передовой разработки, немислимом в государственном масштабе как без ведущей роли М.Ф. Семко, так и без поддержки ведомым им Н.К. Беззубенко, является и то, что им удалось привлечь к ней деятельное внимание головной профильной организации СССР – Экспериментального НИИ металлорежущих станков (ЭНИМС, г. Москва), уже в 1973 году, действуя в рамках заключенного с ХПИ договора о содружестве, проведшего собственные исследования процесса, и уже по их первым результатам активно и последовательно включившегося в разработку, постепенно из статуса партнера ХПИ в ней перейдя в статус координатора государственной научно-технической программы создания техники и технологий алмазно-искрового шлифования.

Завершением первого этапа разработки можно считать проверку в производстве технологического процесса алмазно-искрового шлифования твердосплавных изделий [7], завершение в 1980 году предусмотренного постановлением ГКНТ СССР № 390 от 16.07.76 формирования совместно с НПО ЭНИМС (НИИ и завод "Станкоконструкция"), отраслевыми станкостроительными заводами и специальными конструкторскими бюро технических заданий на создание и освоение производства заточного, кругло- и внутришлифовальных станков для алмазно-эрозионной (алмазно-искровой) обработки.

Увы, заканчивать эти работы, предъявленные Государственной приёмочной комиссии в 1980 году и получившие её высокую оценку [8], Н.К. Беззубенко пришлось уже без М.Ф. Семко – их главного инициатора и вдохновителя.

При алмазно-искровом шлифовании, в сравнении с обычным шлифованием, в два раза и более повышается и стабилизируется во время работы режущая способность абразивного инструмента, что обуславливает повышение производительности, многократно повышается период стойкости круга, вследствие чего значительно снижаются затраты на его правку, на 25-40% снижаются затраты энергии на срез металла, главным образом вследствие снижения потерь на трение связки круга с заготовкой и стружкой, в 1,3-1,5 раза снижается сила резания и средняя температура в зоне шлифования, повышается качество обработки (отсутствие прижогов, микротрещин, других дефектов).

Отсутствие засаливания круга и стабильное обеспечение необходимого выступления режущих зерен над поверхностью связки позволяют, используя этот метод, обрабатывать твёрдые сплавы, безвольфрамовые твёрдые сплавы, нержавеющие, жаропрочные, титановые сплавы, немагнитные и магнитные материалы, износостойкие, труднообрабатываемые наплавки и покрытия, сверхтвёрдые материалы, высокопрочные керамики, силицированный графит,

а также цветные металлы и другие материалы, шлифование которых обычными методами затруднено.

В 1982 году разработка была отмечена дипломом, а ряд представлявших экспонаты ее участников – медалями ВДНХ СССР: золотой (Семко М.Ф.), серебряной (Беззубенко Н.К.) и двумя бронзовыми (Кобзарь Л.Е. и Сальтевский И.С.).

Таблица 1 – Специальные станки-полуавтоматы алмазно-искрового шлифования заводов-производителей в СССР (СНГ):

МСЗ – Мукачевский станкостроительный завод (Украина);

ВЗЗС – Витебский завод заточных станков (Беларусь);

ЛЗШС – Ленинанский завод шлифовальных станков (г. Гюмри, Армения);

ВЗШС – Вильнюсский завод шлифовальных станков (Литва);

СЗШС – Саратовский завод шлифовальных станков (Россия);

ОСШ – Оршанский станкостроительный завод (Беларусь)

Тип станка	Завод	Модель	Объект обработки
Заточной	МСЗ	ЗВ624	Резцы (задние поверхности)
		3629Р	Резцы и выглаживатели (радиусные поверхности)
		ЗВ626	Резцы (передние поверхности)
	ВЗЗС	ЗЕ667РФ1	Фрезерные головки
		ЗМ667Ф2	Фрезы торцовые
		ВЗ-184Р	Коронки буровые
Круглошлифовальный	ЛЗШС	ЗК12Р	Наружные поверхности вращения
		ЗУ12ВРФ11	
	ВЗШС	ВТ-82	
Внутришлифовальный	СЗШС	ЗК227ВР	Внутренние поверхности вращения
		ЗМ227ВЭРФ2	
Плоскошлифовальный	ОСШ	ОШ-226	Плоские поверхности

Следующий этап разработки (80-ые – 90-ые годы) связан с освоением промышленного выпуска специальных станков (табл. 1) и источников технологического тока, широким внедрением разработки в практику металлообрабатывающих отраслей. Государственной программой развития станкостроения СССР на 1986-1990 гг. и на период до 2000 г. предусматривалось расширение технологических возможностей шлифовального оборудования за счёт их дооснащения системами для электроэрозионной правки кругов и стабилизации их режущей способности.

Предусматривалась, в частности, замена станками этого типа большинства ранее выпускавшихся моделей алмазно-электрохимических станков, как не обладающих необходимой эксплуатационной надежностью [9].

В этот же период интерес к подобным разработкам наблюдается и за рубежом СССР. Так, японская фирма Nicco Machine Tool Co разрабатывает к 1986 году серию NSG-52 плоскошлифовальных станков с ЧПУ с использованием системы "Comtec" для электроразрядной правки кругов, обеспечивая тем самым повышение производительности (в 1,4 – 2,5 раза) и качества обработки.

90-е годы отмечаются обобщением теоретических обоснований метода, накопленного опыта лабораторных и промышленных исследований [10, 11]. В условиях опытно-экспериментальной базы филиала возглавляемой Н.К. Беззубенко кафедры «Автоматизация и комплексная механизация машиностроения» на машиностроительном заводе «ФЭД» впервые исследуются технологические возможности алмазно-искрового шлифования с наложением ультразвуковых колебаний [12]. При комбинированном шлифовании с наложением ультразвуковых колебаний действие электрических разрядов обеспечивает формирование рабочего рельефа инструмента и поддержание его режущих свойств при работе, а ультразвук влияет на состояние межэлектродного зазора, способствует инициированию разрядов и повышению их равномерности, изменяет кинематику режущих элементов (их траекторию, геометрию). Колебания создают кавитацию жидкости, активизируя её поверхностно-"режущие" действия, смазывающие и очищающие свойства, что снижает трение, устраняет наросты и налипания. В результате облегчается процесс микрорезания и улучшаются условия формирования обработанной поверхности.

Современный период развития разработки характеризует обращение к аналитическим подходам описания условий устойчивости процесса шлифования, повышения на этой основе уровня прогнозирования и обеспечения технико-экономических показателей алмазно-искровой обработки в реальных условиях [13, 14], эффективной поддержки конструкторской, технологической и организационной подготовки производства (у производителя станков и инструментов) [15], повышения производительности и качества производства, эксплуатационных характеристик шлифованных деталей (у потребителей алмазно-искровых технологий и их продукции) [16].

Помимо ХПИ и НПО ЭНИМС, других проектных, исследовательских и производственных предприятий и организаций станкоинструментальной промышленности в образовавшихся с распадом СССР государствах, прошедшие годы отмечены исследованием и развитием алмазно-искрового шлифования усилиями воспитанников и партнёров харьковской научной школы физики процессов резания в университетских и научно-

производственных центрах Германии (Магдебург), Венгрии (Мишкольц), Индии (Нью-Дели), Вьетнама (Ханой), Нигерии (Абуджа), Армении (Ереван), России (Белгород, Курск, Пенза), Украины (Киев, Днепропетровск, Донецк, Мариуполь, Севастополь, Сумы).

В сорокалетию от первого анонсирования разработки в 1972 г. [2] и последовавшей за ним первой официальной защиты диссертационного исследования процесса с новым термином «алмазно-искровое шлифование» [5], выполненного одним из авторов базового изобретения [2] А.Т. Калашниковым под совместным руководством также авторов [2] М.Ф. Семко и Н.К. Беззубенко, в НТУ «ХПИ» на кафедрах «Резание материалов и режущие инструменты» (ныне – «Интегрированные технологии машиностроения» им. М.Ф. Семко) и «Автоматизация и комплексная механизация машиностроения» (ныне – в составе объединенной кафедры «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты») накоплен обширный опыт разработки и сопровождения внедрения модернизированной и новой техники и технологий; подготовки и переподготовки персонала обслуживания внедряемой техники и технологий; выполнения наукоёмких заказов промышленности, научно-исследовательских и проектных организаций по изготовлению изделий из труднообрабатываемых материалов технологиями алмазно-искрового шлифования.

Основу привлекательности реализации разработок в тематическом поле алмазно-искрового шлифования для машиностроительных, приборостроительных, станкоинструментальных и других предприятий (через создание специальных и модернизацию (расширение технологических возможностей) универсальных шлифовальных станков и производственных модулей, комплектующих такие станки и модули инструментов из сверхтвёрдых материалов и электрофизических систем специального (дополнительного) энергообеспечения; их эксплуатацию) составляют существенное повышение производительности алмазного шлифования и заточки (в 1,5 – 3 раза), режущей способности и стойкости инструмента, вероятности бездефектной обработки, сокращение удельных энергозатрат на механическую обработку, повышение фондоотдачи производственного оборудования и производственных площадей, высвобождение обслуживающего персонала - при дополнительных затратах на модернизацию станка и оснащение его источником (генератором) дополнительной энергии общим объёмом дополнительных затрат 20 – 25% стоимости обычного оборудования.

В сорокалетию исторической ретроспективе алмазно-искрового шлифования внедрение разработки концентрировалось на двух основных направлениях:

- промышленные технологии комбинированного шлифования деталей и заточки инструмента (преимущественно предприятия станкоинструментальной и приборостроительной отраслей Украины и России, в том числе ведущие – Полтавский алмазный завод, Изюмский приборостроительный завод и др.);
- рекомендации и технические задания для создания специальных шлифовальных и заточных станков и производственных модулей (ЭНИМС (г. Москва, Россия) и станкостроительные предприятия Украины, России, Беларуси, Армении, Литвы).

Только от выпуска и реализации в промышленности в 1984 – 1990 гг. 400 специальных станков–полуавтоматов модели 3В624 (Мукачевский станкостроительный завод) годовой экономический эффект в сопоставимых ценах превысил 1,7 млн. долларов США. В целом по промышленности за период 1981 – 1990 гг. известный суммарный экономический эффект превысил 2,5 млн. долларов США, в том числе свыше 450 тыс. долларов США – за счёт внедрения промышленных технологий комбинированного шлифования и заточки в условиях модернизации универсального оборудования [11, 17].

В 1998 – 2005 гг. в условиях филиала НТУ «ХПИ» на ГП ХМЗ ФЭД, а также на базе изучения организации производства и производственной номенклатуры ОАО «Харьковский станкостроительный завод» были разработаны научно обоснованные рекомендации по назначению технологических параметров комбинированного алмазного шлифования, предложены и включены в производственный цикл прогрессивные технологии ряда изделий авиа- и станкостроения, в том числе из труднообрабатываемых сплавов и с повышенными требованиями к точности и качеству обработки. Эта совместная разработка харьковских политехников и заводчан представлялась и отмечена дипломом на региональной выставке - ярмарке «Наука Харьковщины - 2000» (23-25 февраля 2000 г.), а также на ряде других региональных, национальных и международных выставок 2000 – 2006 гг. в Харькове, Киеве, Москве.

В 1991 – 2000 гг. только по предприятиям авиационного машиностроения в г. Харькове, Харьковской и Луганской областях подтверждённый годовой экономический эффект от внедрения разработки составил свыше 1,1 млн. руб. в ценах 1991 г., а после 2001 г. – только по г. Харькову, и только в станкостроительном и авиамашиностроительном сегментах промышленности – свыше 750 тыс. грн. или ок. 100 тыс. долларов США.

В продвижении разработки в промышленность наряду с НТУ «ХПИ» и его филиалами на промышленных предприятиях г. Харькова участвуют и иногородние воспитанники и партнеры харьковской научной школы физики процессов резания по ее развитию и адаптации к конкретным научно-

производственным задачам. Например, усилиями доц. С.М. Братана (впоследствии профессор, зав. кафедрой технологии машиностроения СевНТУ) и асп. А.П. Фалалеева (впоследствии профессор, проректор по научной работе того же университета) в 1996 г. разработка получила «прописку» в АО Судоремонтный завод «Залив» (г. Керчь), и т.д.

Внедрение ближайших новых результатов (после 2010 года), полученных под руководством профессора М.Д. Узуняна на кафедре-основателе метода алмазно-искрового шлифования его молодыми исследователями [18, 19], только по первому опыту заточки на Харьковском электротехническом заводе «Укрэлектромаш» твердосплавных инструментов из ультрасовременного монокристалла вольфрама с субмикро- и наноразмерной структурой и повышенной плотностью компактирования [20], обеспечиваемыми передовыми технологиями электроспекания под давлением, оценено предприятием в 46,8 тыс. грн. годового экономического эффекта [18]. Результаты работы [21] по приложению метода алмазно-искрового шлифования к высококачественной заточке инструментов (резцов) с пластинами из сверхтвердых материалов – алмазно-твердосплавными и на основе кубического нитрида бора – в рамках выполнения научно-исследовательской тематики государственного бюджетирования [22] внедрены в производственную практику ПАО «Харьковский подшипниковый завод» с годовым экономическим эффектом 83,0 тыс. грн. (2015 г.).

Комплекс выполненных исследований и сформировавшихся по их результатам физических представлений о рабочих процессах алмазно-искрового шлифования, помимо резания материалов, способствует развитию и других научно-технических отраслей, в том числе современного инструментального материаловедения: подбор рациональных давлений плотной консолидации порошков из тугоплавкой инструментальной керамики в циклах электроспекания с прямым токоподводом, реализуемых в отношении объектов получения [20] и последующей окончательной обработки [18], следует производить с учетом впервые установленного [23] определенного подобия функций электрического разряда в технологиях электроконсолидации порошковых инструментальных материалов и алмазно-искрового шлифования.

И наоборот, анализ современных межотраслевых тенденций и перспектив научно-технического развития открывает принципиально новые возможности организационно-технологического развития алмазно-искрового шлифования. Используемые в практике военного дела и аналитико-прогностических оценках космогенных катастроф современные представления о взрыве металлов при сверхвысокоскоростном ударе [24] позволяют предвосхищать и проводить предварительные теоретические исследования с новыми акцентами в организации процессов разрушения металлов в рабочей зоне алмазно-искрового шлифования и других видов

комбинированной обработки, использующих высокоскоростные процессы воздействия на металл и электрические поля и токи в зоне обработки (например, процессы электроэрозионной обработки), а именно с использованием взрыва металла силой механического или электрического воздействия как одной из перспективных технологических доминант в механообработке [25, 26]. Несмотря на то, что такие, комбинированные взрывными эффектами потенциальные технологии алмазно-искрового шлифования пока неосуществимы при современном уровне технически достижимых скоростей шлифования, понимание отдаленной перспективы такого развития стимулирует поиск других комбинированных альтернатив в том же направлении взаимного дополнения и усиления эффектов механических и электрических воздействий, что является органической основой непревзойденных преимуществ алмазно-искрового шлифования, с достижением качественно нового интегрального результата, в особенности с избирательным предразрушением и разрушением металла, позволяющим создавать рабочие процессы повышенной продуктивности, устойчивости и управляемости.

Метод алмазно-искрового шлифования, отмеченный Кабинетом Министров Украины в рамках посвященной 20-летию независимости страны общегосударственной акции «Барвыста Украина» как «Лучший отечественный товар 2011 года», реально является конкурентоспособным источником эффективных комбинированных рабочих процессов и технологических решений такого рода в современной экспериментальной и широкой промышленной алмазно-абразивной практике изготовления изделий из труднообрабатываемых материалов.

Высокая оценка современной значимости метода в конкурентоспособном развитии промышленности Украины в самом НТУ «ХПИ», по инициативе руководства университета выдвинутого на авансцену юбилейного всеукраинского смотра-конкурса, высшая оценка на самом конкурсе способствовали возвращению проблематики развития метода в пространство проектов конкурсного отбора за право государственного бюджетирования под эгидой профильного министерства. В 2012 году разрабатывается и подается на министерский конкурс проект прикладной направленности, призванный «собрать камни» исследований и внедрений метода во всей его ретроспективе. В это же время трагически роковой для обоих ведущих инициаторов метода сентябрь, в 1979 году ставший последним в жизни М.Ф. Семко, в 2012 году после продолжительной болезни забирает жизнь Н.К. Беззубенко, которому так удалось познать всеукраинский триумф своего детища в рамках посвященной 20-летию независимости страны выставки-ярмарки достижений регионов «Барвыста Украина»...

Проект 2012 года по научно-прикладному обобщению и анализу опыта

разработки и апробаций метода опроходит конкурсний отбор и выполняется в НТУ «ХПИ» в 2013-2014 гг. при государственной финансовой поддержке по плану НИОКР Министерства образования и науки, молодежи и спорта под руководством профессора А.И. Грабченко [27], возглавившего после М.Ф. Семко кафедру-основатель метода и её научную школу физики процессов резания, со временем всё более охватывающую своим вниманием и интегрированные технологии машиностроения, в новом веке – в особенности компьютерно интегрированные быстрого аддитивного прототипирования лазером [8]. К этому времени, надо заметить, в вузе уже имелся опыт научно-практической разработки лазерной правки алмазных шлифовальных кругов на металлических связках (Добровольская Л.Г., 1995 г. [28], и Добротворский С.С., 1996 г. [29]), потенциально конкурирующей с органически присущей алмазно-искровому шлифованию правкой инструмента в зоне режущего контакта, но не получившей широкого использования. Здесь надо воздать должное масштабу личности Н.К. Беззубенко как истинного рыцаря науки и технического прогресса, поскольку технологически конкурентные методу алмазно-искрового шлифования работы [28, 29] в основном были выполнены вышеуказанными исследователями на возглавляемой им кафедре.

Как уже отмечалось выше, в текущем десятилетии нового века в базовой научной школе активизируется внимание к проблематике теоретического осмысления и практических возможностей, расширения объектов и организации эффективных применений метода. Под руководством профессора М.Д. Узуяна успешно завершаются диссертационные исследования, одно из которых посвящается уже выше отмеченному в связи с обращением к одному из примеров практической востребованности метода промышленностью в недавней ретроспективе (Харьковский электротехнический завод «Укрэлектромаш», 2011 г.) алмазно-искровому шлифованию тонкозернистого монокристалла вольфрама (Стрельчук Р.М., 2011 г. [18]), другое – алмазно-искровому шлифованию твердых сплавов с применением экологически предпочтительной технологии минимальной смазки (Агу Коллинз Агу – именно ему обязана Нигерия присутствием в приведенном выше списке дислокации резидентов-специалистов практики этого метода обработки, 2011 г. [19]), третье, также отмеченное выше в связи с использованием результатов в реальном секторе экономики (ПАО «Харьковский подшипниковый завод», 2015 г.), – обеспечению качества двухслойных алмазных пластин при алмазном шлифовании (Руднев А.В., 2017 г. [21]).

В ходе выполнения НИР [27] автором этих строк инициируется идея производства алмазно-абразивных инструментов для алмазно-искрового шлифования на универсальных станках с локальной токоизоляцией в местах посадочного контакта с инструментальным шпинделем станка металлических

корпусов алмазных шлифовальных кругов на металлических связках [30], посредством которых реализуется этот метод обработки. Токоподвод к таким кругам через свободную от электрической изоляции поверхность инструмента позволяет осуществлять алмазно-искровое шлифование на универсальном станке без специального модернизационного вмешательства в ответственный за его точность шпиндельный узел.

Патентная защита первой из предложенных конструкций шлифовального круга, заключающейся в электроизоляционном микродуговом оксидировании посадочного отверстия инструмента с алюминиевым корпусом, осуществлена совместно с энтузиастами инструментальной конверсии алмазно-искрового шлифования, специалистами-электрохимиками кандидатами технических наук ст. науч. сотрудником Севидовой Е.К. и доцентом Степановой И.И. и завершена в 2015 году [31].

Предварительные экспериментальные проверки функциональной работоспособности микродуговых алюмооксидных покрытий, а также специально разработанных на электроизоляционной эпоксидной основе [32], натурных образцов алмазных шлифовальных кругов новых конструкций с их использованием по прямому назначению позволили обосновано подойти к подготовке ныне выполняемого в НТУ «ХПИ» двухгодичного проекта по разработке конструктивно-технологических основ и технических решений алмазных инструментов повышенной функциональности в реализации электрофизикохимических методов шлифования, в 2016 году получившего высокую оценку экспертов и почетный статус проекта-победителя среди 44-х соискателей государственного бюджетного финансирования в конкурсном отборе по секции «Машиностроение» Научного совета Министерства образования и науки Украины. Промежуточные результаты выполнения этого проекта отражены в научно-техническом отчете по первому этапу (2017 год) [33]. Выполнением этапа заложены предпосылки создания оригинальной системы технических и технологических решений по дальнейшему повышению эффективности комбинированного введением энергии электрического тока в зону резания алмазного шлифования, конкурентоспособности национальных конструкторско-технологических разработок станкоинструментальной систем с расширенными возможностями алмазно-абразивной обработки, а также началу нового системологического направления в классификации и производстве алмазно-абразивных инструментов.

Во всем сорокапятилетии алмазно-искрового шлифования научно-практическая разработка метода, его изучение и индустриализация осуществлялись в содружестве с академическими научными институтами и производственными предприятиями, опирались и ныне опираются на сотрудничество с их ведущими учеными и специалистами, в особенности на

выпускников НТУ «ХПИ» и тех из них, кто имеет опыт работы с методом в лабораторных практиках в стенах alma mater, хорошо знаком с ним по совместным исследованиям на экспериментальных площадках научной школы или по собственной производственной практике. За время своего существования метод алмазного шлифования завоевал доверие и уважение у многих профессионалов вне НТУ «ХПИ». Среди них – ныне начальник лаборатории сверхтвердых аморфных алмазоподобных и поликристаллических алмазных покрытий ННЦ «ХФТИ», доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, лауреат Государственной премии СССР Стрельницкий В.Е., в ушедшем веке прошедший в научной школе физики процессов резания совместную экспериментальную практику криогенного охлаждения зоны резания, а в нынешнем – электрохимических исследований высокофункциональных покрытий. Принятие Стрельницким В.Е. предложения к участию в разработке и выполнении проекта [33] существенно усилило его кадровое обеспечение и стало заслуживающим публичного признания весомым фактором обеспечения успеха проекта на конкурсном этапе его жизненного цикла.

В ближайшей ретроспективной семилетке 2012 – 2018 гг. о своей заинтересованности в имплементации метода, первичной или расширенной, или ее уже проведенном осуществлении официально заявили [27, 22, 33] ГП «Завод им. В.А. Малышева», ГП ХМЗ «ФЭД», ГП «Электротяжмаш», ОАО «Турбоатом», ПАО ХМЗ «Свет шахтера», ПАО «Харьковский подшипниковый завод», ООО «Кермет-У», Институт проблем машиностроения им. А.Н.Подгорного НАН Украины (все – г. Харьков), Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины (г. Киев), ПАО «Полтавский алмазный инструмент» (г. Полтава).

Возвращаясь к актуализации возникновения алмазно-искрового шлифования обострившимся научно-техническим соперничеством сверхдержав, следует заметить, что и сегодня это соперничество в центре геополитической и глобальной экономической конкуренции. В связи с этим отнюдь не случайным представляется присутствие приведенной первой четверки из перечисленного выше десятка предприятий и учреждений в перечне объектов государственной собственности, являющихся стратегически значимыми для экономики и безопасности государства согласно постановления Кабинета Министров Украины № 83 от 4 марта 2015 г.

В разработке алмазно-искрового шлифования, в конце третьей четверти прошлого века шагнувшего в мир техники и технологий из возглавляемой М.Ф. Семко харьковской научной школы физики процессов резания, в разные годы приняли участие десятки сотрудников ряда кафедр и лабораторий Харьковского политехнического института. Она стала достойным всесоюзным детищем в эпоху СССР, продолжается в новом веке, заслуженно

является гордостью НТУ «ХПИ», и нет никакого сомнения, что и число ее энтузиастов, и ряд поддерживающих ее развитие и практику научно-исследовательских институций и промышленных предприятий еще многие годы будут произрастать, как не исчерпает себя и сам метод алмазно-искрового шлифования, открывающий своим исследователям все новые и новые грани технологических, экономических и экологических возможностей и перспектив; являющий собой искорки светлой памяти о М.Ф. Семко и Н.К. Беззубенко, аспирантом которых соответственно в 1978-1979 гг. и в 1979-1980 гг. автор этой обзорной статьи имел честь быть и которым благодарно ее посвящает.

Список использованных источников: 1. *Семко, М.Ф.* О некоторых физических особенностях процесса резания алмазным инструментом / *М.Ф. Семко* // Станки и режущие инструменты. Респ. межведомств. науч.-техн. сб. – Вып. 1. – Алмазная обработка материалов. – Харьков: Изд-во Харьк. гос. ун-та, 1966. – С. 3-9. 2. *Семко, М.Ф.* Способ абразивной обработки металлов: А.с. 494130 СССР, МКИ¹ В 24 в 1/00, В 23 р 1/10 / *М.Ф. Семко, Н.К. Беззубенко, И.С. Сальтевский, А.Т. Калашиников.* – № 1828222/25-8; заявл. 12.09.72; опубл. 25.08.76. Бюл. № 31. 3. *Семко, М.Ф.* Электроэрозионная правка алмазных кругов на металлических связках / *М.Ф. Семко, Н.К. Беззубенко, Э.Б. Михайлуца* // Синтетические алмазы. – Вып. 4. – 1974. – С. 14-17. 4. *Семко, М.Ф.* Интенсифицированный способ алмазно-искрового шлифования / *М.Ф. Семко, Н.К. Беззубенко, И.С. Сальтевский, А.Т. Калашиников* // Новые технологические процессы. – М.: ГосИНТИ. 1975. – Вып. 11-75. – С. 1-4. 5. *Калашиников, А.Т.* Исследование физических особенностей и технологических возможностей алмазно-искрового шлифования: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.03.03 – обработка материалов резанием / *А.Т. Калашиников*, Харьк. политехн. ин-т [выполнена], Моск. высш. техн. училище им. Н.Э. Баумана [защита]; науч. рук.: *М.Ф. Семко, Н.К. Беззубенко.* – М., 1976. – 22 с. 6. *Семко, М.Ф.* Разработки на уровень изобретений / *М.Ф. Семко, Н.К. Беззубенко* // Ленинские кадры. – 31 августа 1979. – № 25. – С. 2. 7. *Беззубенко, Н.К.* Разработать и проверить в производстве технологический процесс алмазного шлифования деталей из твердых сплавов с воздействием электрическими разрядами на режущую поверхность круга и обрабатываемую деталь, обеспечивающий повышение (в 2 раза) производительности труда и качества обработки, выдать рекомендации по внедрению этого процесса на машиностроительных предприятиях (Дополнит. задание Гос. ком. по науке и технике СССР, постановление № 80 от 3 мая 1979 г.): Отчет о НИР / *Н.К. Беззубенко, Н.П. Иванов, Ю.Г. Гуцаленко, Н.Н. Серова, П.К. Скоробогатько*; рук. темы *Н.К. Беззубенко.* – № гос. рег. 80016180; Инв. № Б924882. – Харьк. политехн. ин-т; Проблемная науч.-исслед. лаб. физики процессов резания инструментами из сверхтвердых поликристалл. материалов. – Харьков, 1980. – 99 с. 8. *Машинобудівний факультет. 125 років у складі ХПІ: монографія* / За заг. ред. *А.І. Грабченка і М.С. Степанова.* – Х.: Вид-во «Курсор», 2010. – 212 с. 9. *Коньшин, А.С.* Шлифовальные станки в двенадцатой пятилетке / *А.С. Коньшин* // Механизация и автоматизация производства. – М.: Изд-во "Машиностроение". – 1987. – № 4. – С. 6-9. 10. *Кобзарь, Л.Е.* Прогрессивное алмазно-искровое шлифование / *Л.Е. Кобзарь, В.А. Фадеев, Н.К. Беззубенко.* – Харьков: ХГПУ – ХНПО «ФЭД», 1995. – 152 с. 11. *Беззубенко, Н.К.* Повышение эффективности алмазного шлифования путем введения в зону обработки дополнительной энергии в форме электрических разрядов: Дис. ... докт. техн. наук: 05.03.01 – процессы механической обработки, станки и инструменты / *Н.К. Беззубенко*, Харьк. гос. политехн. ун-т. – Харьков, 1995. – 468 с. 12. *Набока, Е.В.* Интенсификация алмазно-искрового шлифования ультразвуковыми колебаниями // Резание и инструмент в технологических системах / *Е.В. Набока.* – Харьков, 1997. – Вып. 51. – С. 186-190. 13. *Новиков, Ф.В.* Эффективность применения алмазного электроэрозионного шлифования / *Ф.В. Новиков, Г.В. Новиков, Ю.Г. Гуцаленко* // В кн.: Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под

общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В 10-ти томах. – Т. 6 : Качество обработки деталей машин. – Одесса : ОНПУ, 2003. – С. 171-220. **14. Новиков, Ф.В.** Оптимизация параметров энергетически равновесного процесса алмазного шлифования / *Ф.В. Новиков, Г.В. Новиков, Ю.Г. Гуцаленко* // В кн. : Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологий машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В 10-ти томах. – Т.9 : Проектирование технологических процессов в машиностроении. – Одесса : ОНПУ, 2005. – С. 477-509. **15. Гуцаленко, Ю.Г.** Доцільність і особливості організації торцевого планетарного шліфування у електрофізикохімічних технологіях / *Ю.Г. Гуцаленко* // Вісн. Харк. нац. техн. ун-ту сіл. госп-ва. – 2010. – Вип.106: Техн. сервіс АПК, техніка та технології у с.-г. машинобудуванні. – С. 134-140. **16. Узунян, М.Д.** Алмазно-іскрове шліфування твердих сплавів / *М.Д. Узунян*. – Х. : НТУ «ХПІ», 2003. – 359 с. **17. Беззубенко, Н.К.** Алмазно-іскрове шліфування: краткий обзор разработки харьковской научной школы физики процессов резания / *Н.К. Беззубенко, Ю.Г. Гуцаленко* // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я : Матеріали міжнар. наук.-практ. конф. 18-19 трав. 2006 р., присвяч. 100-річчю з дня народження М.Ф. Семка. – Х. : Вид-во „Курсор”, 2006. – С. 60-66. **18. Стрельчук, Р.М.** Визначення особливостей та раціональних умов алмазно-іскрового шліфування твердих сплавів з нанорозмірних зерен монокрибіду вольфраму : Дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 – процеси механічної обробки, верстати та інструменти / *Р.М. Стрельчук*, Нац. техн. ун-т «Харк. політехн. ін-т»; наук. кер. М.Д. Узунян. – Х., 2011. – 193 с. **19. Агу Коллінз Агу.** Підвищення ефективності алмазно-іскрового шліфування твердих сплавів шляхом застосування технології мінімального змачування : Дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 – процеси механічної обробки, верстати та інструменти / *Агу Коллінз Агу*, Нац. техн. ун-т «Харк. політехн. ін-т»; наук. кер. М.Д. Узунян. – Х., 2011. – 177 с. **20. Геворкян, Е.С.** Цільні та поруваті конструкційні матеріали з нано- та субмікронних порошків WC, Al₂O₃ і SiC поліфункціонального призначення : Дис. ... д-ра техн. наук : 05.17.11 – технологія тугоплавких неметалічних матеріалів / *Е.С. Геворкян*, Укр. держ. акад. залізнич. трансп. [виконана], Нац. техн. ун-т «Харк. політехн. ін-т» [захищена]. – Харків, 2008. – 289 с. **21. Руднєв, О.В.** Забезпечення якості двохарових алмазних пластин при алмазно-іскровому шліфуванні на основі аналізу приведенного профілю ріжучої поверхні круга : Дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 – процеси механічної обробки, верстати та інструменти / *О.В. Руднєв*, Нац. техн. ун-т «Харк. політехн. ін-т»; наук. кер. М.Д. Узунян. – Х., 2017. – 164 с. **22. Грабченко, А.** Розробка техніко-технологічних рішень і дослідних зразків елементів системи «верстат-оснастка-інструмент» плоского торцевого шліфування важкооброблюваних матеріалів : Звіт про НДР (заключн.) / *А. Грабченко, Ю. Гуцаленко, І. Пижов та ін.*; кер. теми *А. Грабченко*, відп. вик. *Ю. Гуцаленко*. – № держ. реєстрації 0115U000524; інв. № 0217U001289. – Нац. техн. ун-т "Харк. політехн. ін-т". – Х., 2016. – 380 с. **23. Гуцаленко, Ю.Г.** Определение рационального давления прессования при нанопорошковой электроконсолидации / *Ю.Г. Гуцаленко* // Високі технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. – Х. : НТУ “ХПІ”, 2011. – Вип.1 (21). – С. 50-61. **24. Марахтанов, М.** Металл взрывается! / *М. Марахтанов, А. Марахтанов* // Наука и жизнь. – 2002. – № 4. – С. 16-19. **25. Гуцаленко, Ю.Г.** Особенности электроэрозионного разрушения металлов при высокоскоростном алмазно-искровом шлифовании / *Ю.Г. Гуцаленко* // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я : Матер. міжнар. наук.-практ. конф. 15-16 трав. 2003 р. – Х. : НТУ “ХПІ”, 2003. – С. 17-26. **26. Беззубенко, М.К.** Алмазно-іскрове шліфування: назустріч 40-річчю / *Н.К. Беззубенко, Ю.Г. Гуцаленко* // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я : Тези доп. XX міжнар. наук.-практ. конф., Ч. I (15-17 трав. 2012 р., Харків). – Х. : НТУ «ХПІ», 2012. – С. 92. **27. Грабченко, А.** Разработка технических решений специальной модернизации универсальных станков и технологических баз данных для алмазно-искрового шлифования труднообрабатываемых материалов : Отчет о НИР (заключит.) / *А. Грабченко, Ю. Гуцаленко, И. Пыжов и др.*; рук. темы *А. Грабченко*, отв. исп. *Ю. Гуцаленко*. – № гос. рег. 0113U000425; инв. № 0215U001303. – Нац. техн. ун-т "Харк. политехн. ин-т". – Харьков, 2014. – 518 с. **28. Добровольская, Л.Г.** Совершенствование технологии процесса правки алмазных шлифовальных кругов на металлических связках путем использования лазерного излучения : Дис...канд. техн. наук : 05.03.01 – процессы механической обработки, станки и инструменты / *Л.Г. Добровольская*,

Харьков. гос. политехн. ун-т. – Х., 1995. – 194 с. **29.** Доброворський, С.С. Наукові основи процесу лазерної правки лшліфувальних кругів з надтвердих матеріалів : Дис. ... д-ра техн. наук : 05.03.07 – процеси лазерної та фізико-технічної обробки / С.С. Доброворський, Харк. держ. техн. ун-т [виконана], Нац. техн. ун-т України «Київ. політехн. ін-т» [захищена]. – К., 1996. – 327 с. **30.** Гуцаленко, Ю.Г. Организация технических систем и технологические перспективы алмазно-искрового шлифования / Ю.Г. Гуцаленко // Високі технології в машинобудуванні : зб. наук. праць. – Вип. 1(23) – Х. : НТУ «ХПІ», 2013. – С.30-39. **31.** Гуцаленко, Ю.Г. Шліфувальний круг: патент на корисну модель № 96568 Україна: МПК (2006.01) B24D 3/06 / Ю.Г. Гуцаленко, О.К. Севидова, І.І. Степанова; власник : Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – № 201409394; заявл. 26.08.2014; опубл. 10.02.2015. Бюл. № 3. **32.** Гуцаленко, Ю.Г. Композиція для електроізоляційних зносостійких покриттів : патент на корисну модель № 92786 Україна : МПК C08L 63/02 (2006.01), C08J 5/16 (2006.01) / Ю.Г. Гуцаленко, В.В. Івкін, О.В. Руднєв, О.К. Севидова; власник : Нац. техн. ун-т «Харк. політехн. ін-т». – № 201315441; заявл. 30.12.2013; опубл. 10.09.2014. Бюл. № 17. **33.** Грабченко, А.І. Розробка конструкційно-технологічних основ і технічних рішень алмазних інструментів підвищеної функціональності в реалізації електрофізикохімічних методів шліфування : Звіт про НДР (пром. інж.) / А.І. Грабченко, О.К. Севидова, О.М. Шелковий та ін.; кер. теми А.І. Грабченко, відп. вик. О.К. Севидова. – № держ. реєстрації 0117U004883; інв. № 0218U001286. – Нац. техн. ун-т "Харк. політехн. ін-т". – Х., 2017. – 256 с.

Bibliography (transliterated): 1. Semko, M.F. "O nekotoryh fizicheskikh osobennostyah processa rezaniya almaznym instrumentom". *Stanki i rezhushchie instrumenty*. Iss. 1: Almaznaya obrabotka materialov. Kharkov, 1966. 3-9. Print. 2. Semko, M.F., et al. *Sposob abrazivnoy obrabotki metallov: a. s.* No. 494130 USSR. IPC¹ B 24 в 1/00, B 23 p 1/10. No. 1828222/25-8. Appl. 12.09.1972. Publish. 25.08.1976. Bull. No. 31. Print. 3. Semko, M.F., N.K. Bezzubenko, and E.B. Mihajluca. "Elektroehrozionnaya pravka almaznykh krugov na metallicheskih svyazkah". *Sinteticheskie almazы*. 1974. Iss. 4. 14-17. Print. 4. Semko, M.F., et al. "Intensificirovannyй sposob almazno-iskrovogo shlifovaniya". *Novye tekhnologicheskie processы*. Moscow: GosINTI. 1975. Iss. 11-75. 1-4. Print. 5. Kalashnikov, A.T. *Issledovanie fizicheskikh osobennostey i tekhnologicheskikh vozmozhnostey almazno-iskrovogo shlifovaniya. Avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk*. Moscow, 1976. Print. 6. Semko, M.F., and N.K. Bezzubenko. "Razrabotki na uroven' izobreteniy". *Leninskie kadry*. 1979, August 31. No. 25. 2. Print. 7. Bezzubenko, N.K., et al. *Razrabotat' i proverit' v proizvodstve tekhnologicheskij process almaznogo shlifovaniya detalej iz tverdykh splavov s vozdejstviem ehlektricheskimi razryadami na rezhushchuyu poverhnost' kruga i obrabatyvaemuyu detal', obespechivayushchij povыshenie (v 2 raza) proizvoditel'nosti truda i kachestva obrabotki, vydat' rekomendacii po vnedreniyu ehtogo processa na mashinostroitel'nyh predpriyatiyah (Dopolnit. zadanie Gos. kom. po nauke i tekhnike SSSR, postanovlenie № 80 ot 3 may 1979 g.)*. *Otchet o NIR*. No. gos. reg. 80016180, Inv. No. B924882. Ruk. temy N.K. Bezzubenko. – No. gos. reg. 80016180, inv. No. B924882. Kharkov Polytechnic Inst., Problemnaya nauch.-issled. lab. fiziki processov rezaniya instrumentami iz sverhtverdykh polikrystall. materialov. Khar'kov, 1980. Print. 8. *Mashinobudivniy fakul'tet. 125 rokov u skladi KhPI*. Ed. by A.I. Grabchenko and M.S. Stepanov. Kharkov: Kursor, 2010. Print. 9. Kon'shin, A.S. "Shlifoval'nye stanki v dvenadcatoy pyatiletke". *Mekhanizatsiya i avtomatizatsiya proizvodstva*. Moscow: Mashinostroenie, 1987. No. 4, 6-7. Print. 10. Kobzar', L.E., V.A. Fadeev, and N.K. Bezzubenko. *Progressivnoe almazno-iskrovoe shlifofanie*. Kharkov: Kharkov State Polytech.Univ., Kharkov R&D Prod. Assoc. FED, 1995. Print. 11. Bezzubenko, N.K. *Povыshenie jeffektivnosti almaznogo shlifovaniya putem vvedeniya v zonu obrabotki dopolnitel'noj jenerгии v forme jelektricheskikh razryadov*. Dis. ... d-ra tehn. nauk. Kharkov, 1996. Print. 12. Naboka, E.V. "Intensifikatsiya almazno-iskrovogo shlifovaniya ul'trazvukovymi kolebaniyami". *Rezanie i instrument v tekhnologicheskikh sistemah*. Kharkov, 1997. Iss. 51, 186-190. Print. 13. Novikov, F.V., G.V. Novikov, and Yu.G. Gutsalenko. "Effektivnost' primeneniya almaznogo ehlektroehroziionnogo shlifovaniya". In the 10-vol. ed.: *Fiziko-matematicheskaya teoriya processov obrabotki materialov i tekhnologii mashinostroeniya*. Vol. 6: *Kachestvo obrabotki detalej mashin*. Ed. by F.V. Novikov and A.V. Yakimov. Odessa: ONPU, 2003. 171-220. Print. 14. Novikov, F.V., G.V. Novikov, and Yu.G. Gutsalenko. "Optimizatsiya parametrov ehnergeticheski ravnovesnogo processa almaznogo shlifovaniya". In the 10-vol. ed.: *Fiziko-*

*matematicheskaya teoriya processov obrabotki materialov i tekhnologii mashinostroeniya. Vol. 9: Proektirovanie tekhnologicheskikh processov v mashinostroenii. Ed. by F.V. Novikov and A.V. Yakimov. Odessa: ONPU, 2005. 477-509. Print. 15. Gutsalenko, Yu.G. "Docil'nist' i osoblivosti organizatsii torcevoogo planetarnogo shlifuvannya u elektrofizikohimichnih tekhnologiyah". *Visn. Hark. nac. tekhn. un-tu sil. gosp-va*. 2010. Iss. 106: Tekhn. servis APK, tekhnika ta tekhnologii u s.-g. Mashinobuduvanni, 134-140. Print. 16. Uzunyan, M.D. *Almazno-iskrove shlifuvannya tverdykh splavov*. Kharkov, NTU «KhPI», 2003. Print. 17. Bezzubenko, N.K. "Almazno-iskrovoe shlifovanie: kratkij obzor razrabotki har'kovskoj nauchnoj shkoly fiziki processov rezaniya". Informatsijni tekhnologii : nauka, tekhnika, tekhnologiya, osvita, zdorov'ya: Materiali mizhnar. nauk.-prakt. konf. 18-19 trav. 2006 r., prisvyach. 100-richchyu z dnya narodzhennya M.F. Semka. Kharkov: Cursor, 2006. 60-66. Print. 18. Strel'chuk, R.M. *Viznachennja osoblivostej ta racional'nih umov almazno-iskrovogo shlifuvannya tverdykh splaviv z nanorozmernih zeren monokarbidu vol'framu. Dis. ... kand. tehn. nauk*. Kharkov, 2011. Print. 19. Agu Kollinz Agu. *Pidvishchennja efektnosti almazno-iskrovogo shlifuvannya tverdykh splaviv shlyahom zastosuvannya tekhnologii minimal'nogo zmashchuvannya. Dis. ... kand. tekhn. nauk*. Kharkov, 2011. Print. 20. Gevorkyan, E.S. *Shchil'ni ta poruvati konstrukcijni materiali z nano- ta submikronnih poroshkiv WC, Al₂O₃ i SiC polifunkcional'nogo priznachennja. Dis. ... d-ra tekhn. nauk*. Kharkov, 2008. Print. 21. Rudnev, O.V. *Zabezpechennja yakosti dvosharovykh almaznykh plastyn pry almazno-iskrovomu shlifuvanni na osnovi analizu pryvedenoho profilyu rizhuchoyi poverkhnji kruha. Dis. kand. tekhn. nauk*. Kharkov, 2017. Print. 22. Grabchenko, A., et. al. *Rozrobka tekhniko-tekhnologichnih rishen' i doslidnih zrazkiv elementiv sistemi «verstat-osnastka-instrument» ploskogo torcevoogo shlifuvannya vazhkoobroblyvanih materialiv. Zvit pro NDR (zaklyuchn.)*. No. derzh. reestratsii 0115U000524, inv. No. 0217U001289. Ker. temi A. Grabchenko, vidp. vik. Yu. Gutsalenko. Nat. Tech. Univ. "Kharkov Polytechnic Inst." Kharkov, 2016. Print. 23. Gutsalenko, Yu.G. "Opredelenie racional'nogo davleniya pressovaniya pri nanoporoshkovoj ehlektrokonsolidatsii". *Visoki tekhnologii v mashinobuduvanni*. Kharkov: NTU «KhPI», 2011. Iss. 1(21), 50-61. Print. 24. Marahtanov, M., and A. Marahtanov. "Metall vzryvaetsya!". *Nauka i zhizn'*. 2002, No. 4. 16-19. Print. 25. Gutsalenko, Yu. G. "Osobennosti jelektrogerozhonnogo razrusheniya metallov pry vysokoskorostnom almazno-iskrovom shlifovanii". *Informatsijni tehnologii: nauka, tekhnika, tekhnologija, osvita, zdorov'ja: Mater. mizhnar. nauk.-prakt. konf. 15th-16th May 2003*. Kharkov: NTU "KhPI", 2003. 17-26. Print. 26. Bezzubenko, M.K., and Yu. Gutsalenko. "Almazno-iskrove shlifuvannya: nazustrich 40-richchyu". *Informatsijni tekhnologii: nauka, tekhnika, tekhnologiya, osvita, zdorov'ja: Tezi dop. XX mizhnar. nauk.-prakt. konf., Part I (15-17 trav. 2012, Kharkov)*. Kharkov: NTU «KhPI», 2012. 92. Print. 27. Grabchenko, A., et. al. *Razrabotka tehniceskikh reshenij special'noj modernizatsii universal'nyh stankov i tekhnologicheskikh baz dannyh dlja almazno-iskrovogo shlifuvaniya trudnoobrabatyvaemyh materialov. Otchet o NIR*. No. gos. reg. 0113U000425, inv. No. 0215U001303. Ruk. temy A. Grabchenko, otv. isp. Yu. Gutsalenko. Nat. Tech. Univ. "Kharkov Polytechnic Inst." Kharkov, 2014. Print. 28. Dobrovol'skaya, L.G. *Sovershenstvovanie tekhnologii processa pravki almaznykh shlifoval'nykh krugov na metallicheskih svyazkah putem ispol'zovaniya lazernogo izlucheniya. Dis...kand. tekhn. nauk*. Kharkov, 1995. Print. 29. Dobrotvors'kij, S.S. *Naukovi osnovi procesu lazernoj pravki shlifival'nykh krugiv z nadtvrdykh materialiv. Dis. ... d-ra tekhn. nauk*. Kiev, 1996. Print. 30. Gutsalenko, Yu.G. "Organizatsiya tehniceskikh sistem i tekhnologicheskije perspektivy almazno-iskrovogo shlifuvaniya". *Visoki tekhnologii v mashinobuduvanni*. Kharkov: NTU «KhPI», 2013. Iss. 1(23), 30-39. Print. 31. Gutsalenko, Yu.G., O.K. Sevidova, and I.I. Stepanova. *Shlifival'nij krug: patent na korisnu model'*. No. 96568 Ukraine. IPC, 2006.01 B24D 3/06. No. u 2014 09394. Appl. 26.08.2014. Publish. 10.02.2015. Bull. No. 3. Print. 32. Gutsalenko, Yu.G., et al. *Kompozitsija dlja elektroizoljatsijnih znosostijkih pokrivitv: patent na korisnu model'*. No. 92786 Ukraine. IPC, 2006.01 C08L 63/02, C08J 5/16. No. u 201315441. Appl. 30.12.2013. Publish. 10.09.2014. Bull. No. 17. Print. 33. Grabchenko, A.I., et. al. *Rozrobka konstrukcijnno-tekhnologichnih osnov i tehnicnih rishen' almaznih instrumentiv pidvishchenoi funkcional'nosti v realizatsii elektrofizikohimichnih metodiv shlifuvannya : Zvit pro NDR (promizhn.)*. No. derzh. reestratsii 0117U004883, inv. No. 0218U001286. Ker. temi A.I. Grabchenko, vidp. vik. O.K. Sevidova. Nat. Tech. Univ. "Kharkov Polytechnic Inst." Kharkov, 2017. Print.*

Надійшла до редколегії 25.06.2018

УДК 621.9-1/-9

Іванов В.О., канд. техн. наук, Ляпощенко О.О., докт. техн. наук,
Павленко І.В., канд. техн. наук, Суми, Україна

КЛАСИФІКАЦІЇ ОПОРНИХ ЕЛЕМЕНТІВ МОДУЛЬНИХ ВЕРСТАТНИХ ПРИСТРОЇВ

Існуючі конструкції верстатних пристроїв не здатні у повному обсязі забезпечити ефективне використання металорізальних верстатів у багатомоделітному виробництві, що пов'язано з великими фінансовими затратами та значними витратами матеріалів. Метою роботи є систематизація та розроблення конструкторсько-технологічної класифікації опорних елементів на прикладі колон, плит, кутників і кубів. У роботі проаналізовано основні типорозміри, конструктивні елементи та матеріали, виявлено раціональну область їх застосування на свердильно-фрезерно-розточувальних верстатах. Запропонована класифікація покладена в основу функціонування системи автоматизованого проектування верстатних пристроїв.

Ключові слова: верстатні пристосування, систематизація конструкторсько-технологічної класифікації, опорні елементи

Существующие конструкции станочных устройств не способны в полном объеме обеспечить эффективное использование металлорежущих станков в многомоделном производстве, что связано с большими финансовыми затратами и значительными затратами материалов. Целью работы является систематизация и разработка конструкторско-технологической классификации опорных элементов на примере колонн, плит, уголков и кубов. В работе проанализированы основные типоразмеры, конструктивные элементы и материалы, выявлена рациональная область их применения на сверлильно-фрезерно-расточных станках. Предложенная классификация положена в основу функционирования системы автоматизированного проектирования станочных приспособлений.

Ключевые слова: станочные приспособления, систематизация конструкторско-технологической классификации, опорные элементы

Existing designs of machine tools are not fully capable of ensuring the efficient use of metal-cutting machine tools in multi-product manufacturing, which is associated with high financial costs and significant material costs. The purpose of the work is to systematize and design the design and technological classification of supporting elements on an example of columns, slabs, angles and cubes. In the work the basic sizes, structural elements and materials are analyzed, the rational area of their application on the boring and milling boring machines is revealed. The proposed classification is the basis for the functioning of the automated design of machine tools.

Key words: machine tools, systematization of design and technological classification, supporting elements

Вступ

Для підвищення конкурентоспроможності машинобудівної продукції України ринок вимагає від виробників забезпечення високої ефективності технологічних процесів. Верстатні пристроїв (ВП) призначені для точного базування та надійного закріплення заготовки при обробці на металорізальному верстаті та є невід'ємною частиною замкненої технологічної системи «верстат – верстатний пристрій – заготовка –

різальний інструмент» [1–3]. Модульні ВП мають визначену структуру [4,5] та складаються з таких функціональних елементів [6]: опорні елементи; установлювальні елементи; затискні елементи. З'єднання та закріплення функціональних елементів між собою здійснюється за допомогою різних кріпильних елементів (шпонки, гвинти, шайби, гайки, втулки тощо). Швидкість складання компонування ВП забезпечується універсальністю конструкції, високою точністю і взаємозамінністю елементів. Опорні елементи є основою для формування компонувань ВП [7–9].

Широка номенклатура та різноманіття опорних елементів дозволяють складати велику кількість різноманітних ВП, які використовуються для обробки одностипних деталей, що з одного боку, забезпечує багатоваріантність, а з іншого – суттєво ускладнює задачу визначення оптимальної компоновки ВП для певних виробничих умов.

Метою роботи є систематизація та розроблення класифікації опорних елементів модульних ВП на прикладі колон, плит, кутників і кубів за конструкторсько-технологічними ознаками.

Колони

Розроблено класифікацію колон, призначених для установлення заготовок на свердлильно-фрезерно-розточувальних верстатах, у тому числі оброблюваних центрах із ЧПК (рис. 1).

Колони, як правило, використовують на верстатах горизонтального компонування. За кількістю робочих поверхонь колони можуть бути: трикутні, чотирикутні, шестикутні та восьмикутні [10–18]. Збільшення кількості робочих поверхонь забезпечує встановлення більшої кількості заготовок. Причому важливу роль відіграє просторове розташування робочих поверхонь. Так, трикутні колони можуть бути двох типів: рівносторонні [10, 16] та Y-подібні [10, 14, 16]. Рівносторонні колони характеризуються більш широкою робочою поверхнею, а отже, більшою жорсткістю. Це дозволяє використовувати більш інтенсивні режими обробки та виключає появу вібрацій при обробці (рис. 2 а). Y-подібні колони характеризуються широкою інструментальною доступністю, забезпечуючи обробку заготовок осьовим інструментом із кількох сторін. При даній конструкції робочі поверхні є меншими, ніж у попередній, що не дозволяє встановлювати заготовки великих розмірів (рис. 2 б).

Чотирикутні колони забезпечують одночасне установлення чотирьох заготовок із їх послідовною обробкою. Серед існуючих варіантів чотирикутних колон виділяють: квадратні [10–18]; хрестоподібні [10, 16–18]; хрестоподібні прямокутні [17]. Квадратні колони є найбільш розповсюдженим типом, характеризуються високою жорсткістю та забезпечують установлення заготовок великих розмірів (рис. 2 в).

Хрестоподібні колони дозволяють обробку поверхонь заготовок із різних сторін і мають більшу інструментальну доступність (рис. 2 г).

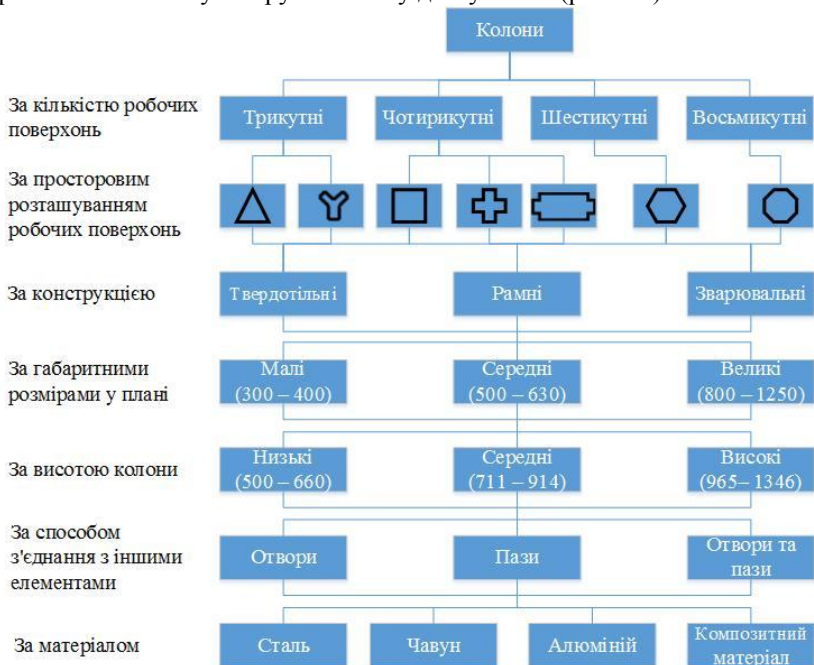


Рисунок 1 – Класифікація колон

Збільшення кількості робочих поверхонь призводить до зменшення їх ширини, що впливає на діапазон заготовок, які можуть бути встановлені. Однією з переваг шести- та восьмикутних колон (рис. 2 д, е) є можливість реалізації комплексної обробки заготовок з усіх сторін [10, 16–18]. Так, на непарних робочих поверхнях установлюються заготовки для реалізації установу А, а на парних – установу Б. Крім того такі колони скорочують кількість заготовок, що очікують обробку навколо верстатів.

За конструкцією колони поділяються на твердотільні, рамні та зварювальні. Твердотільні колони являють собою монолітну конструкцію, яка характеризується високою жорсткістю, але надлишковою металомісткістю. Це унеможливило їх використання на легких і середніх верстатах у зв'язку з невисокою вантажопідйомністю робочого стола (рис. 3 а). Рамні колони вирішують проблеми зменшення металомісткості, забезпечуючи необхідні показники жорсткості. Крім того, це дозволяє пришвидшити переміщення робочих органів верстатів. Але застосування колон рамного типу потребує використання додаткових базових плит, на яких будуть встановлені оброблювані заготовки (рис. 3 б). Зварювальні колони дозволяють зменшити

витрати на їх виготовлення за рахунок використання листового прокату, різних матеріалів для основи та робочих поверхонь, а також менш трудомісткого технологічного процесу їх виготовлення (рис. 3 в).

Закріплення заготовок та з'єднання з іншими елементами на колонах здійснюються різними способами через отвори (рис. 4 а), які можуть бути гладкі, різьбові та комбіновані, а також через Т-подібні (рис. 4 б) або П-подібні пази, які можуть бути поздовжні, поперечні та взаємно перпендикулярні.

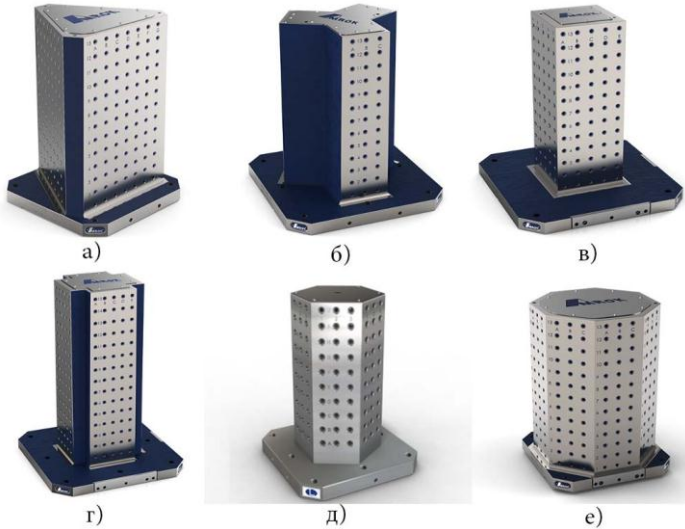


Рисунок 2 – Конструкція колон: а – трикутна рівностороння; б – трикутна Y-подібна; в – квадратна; г – хрестоподібна; д – шестикутна; е – восьмикутна

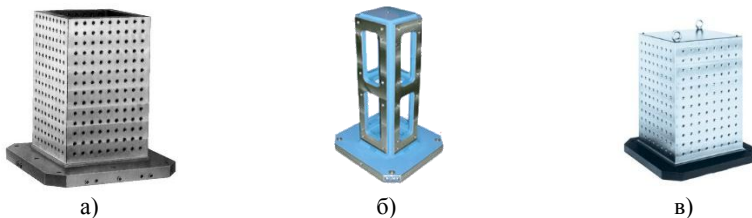


Рисунок 3 – Конструкції колон: а – твердотільна; б – рамна; в – зварювальна

Світові виробники опорних елементів [10–18] дотримуються стандартного ряду розмірів. За габаритними розмірами у плані колони поділяються на малі (300–400 мм), середні (500–630 мм) та великі (800–1250 мм) [11, 14, 15, 18]. Слід зазначити, що шестикутні та восьмикутні

колони не мають великих типорозмірів. За висотою колони поділяються на низькі (500–650 мм), середні (750–850 мм) та високі (800–1250 мм) [11, 14, 15, 18]. На середніх та високих колонах можливо розміщувати по дві заготовки невеликих розмірів.

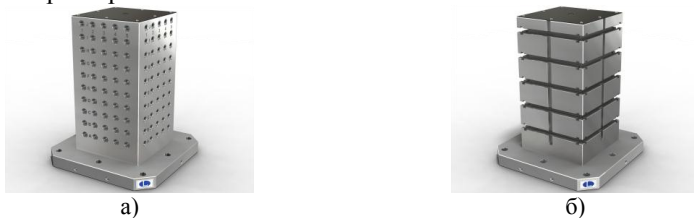


Рисунок 4 – Способи з'єднання: а – отвори; б – пази

Традиційно для виготовлення колон використовують сталь, чавун, алюміній та композиційні матеріали [11, 13, 16–18]. Останні набувають поширення у зв'язку з фізико-механічними властивостями, які забезпечують стійкість до корозії та теплового розширення, а також вібростійкість. А це сприяє застосуванню колон із композиційних матеріалів у складних виробничих умовах. Порівняно з опорними елементами, виготовленими з алюмінію, верстат може переміщувати колони на максимальній швидкості, що ідеально підходить для високошвидкісних обробних центрів, де маса і точність є важливими факторами.

Базові плити

Базові плити є найпоширенішими опорними елементами, на яких монтується до 80% ВП. Вони є основою компонувань ВП і використовуються для базування і закріплення заготовок корпусних і площинних деталей при їх обробці на багатоцільових свердлильно-фрезерно-розточувальних верстатах із ЧПК. Конструкції деталей і складальних одиниць досить складні і універсальні, що забезпечує можливість обробки самих різних заготовок. Від якості базових плит залежить жорсткість і точність ВП. На основі аналізу конструкцій базових плит різних виробників [10–18] розроблено відповідну класифікацію (рис. 5).

За геометричною формою робочої поверхні базові плити бувають: прямокутні (рис. 6 а), квадратні (рис. 6 б) та круглі (рис. 6 в). Вибір базових плит залежить від геометричної форми заготовки. За габаритними розмірами базові плити поділяються на малі (300–400 мм), середні (500–630 мм) та великі (800–1250 мм). На середніх та великих базових плитах можливо розміщувати кілька невеликих заготовок. За висотою базові плити поділяються на низькі (50 мм), середні (60 мм) та високі (75 мм) [11, 14, 15, 18].

Закріплення заготовок та з'єднання з іншими функціональними елементами на базових плитах здійснюється через отвори (рис. 7 а), які можуть бути гладкі, різьбові та комбіновані, а також через Т-подібні та П-

подібні пази (рис. 7 б), які розташовуються поздовжньо, поперечно та взаємно перпендикулярно або одночасно отвори та пази (рис. 7 в).



Рисунок 5 – Класифікація базових плит

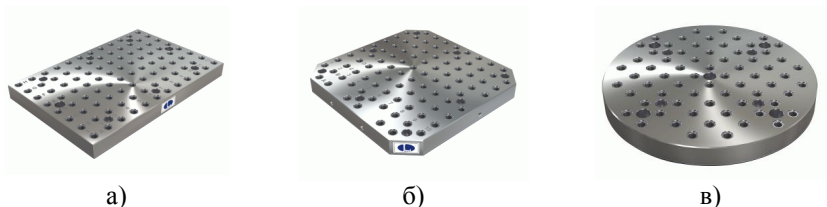


Рисунок 6 – Класифікація базових плит за геометричною формою: а – прямокутна; б – квадратна; в – кругла

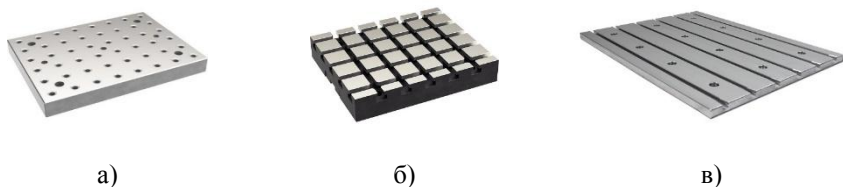


Рисунок 7 – Класифікація базових плит за способом з'єднання з іншими функціональними елементами: а – отвори; б – пази; в – отвори та пази

За ступенем механізації базові плити поділяються на немеханізовані (рис. 8 а) та механізовані (рис. 8 б). Для механізації базових плит застосовуються елементи пневмо- і гідроприводу – пневмоперетворювачі (тиск стисненого повітря перетворюється в тиск масла), пневмогідропідсилювачі, акумулятори, дроселі. Механізовані елементи з'єднуються в загальну схему за допомогою арматури – рукавів високого та низького тиску, штуцерів, косинців, хрестовин, колекторів і т.д. При складанні використовуються також допоміжні деталі – кулачки, заглушки, пружини.

Для виготовлення базових плит використовують сталь (12ХН3А, 20Х, А36, С1119), чавун (FC300, FC250, СЧ30), алюміній (6061) [10–18].

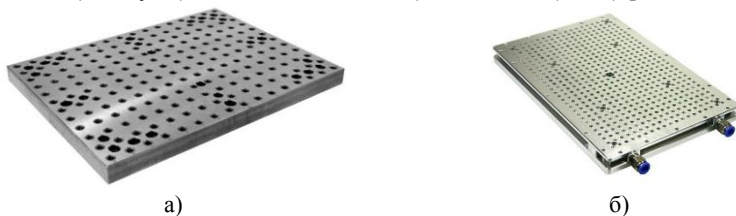


Рисунок 8 – Класифікація базових плит за ступенем механізації:
а – немеханізована; б – механізована (гідрофікована)

Кутники

Кутники призначені для базування і закріплення заготовок корпусних і площинних деталей у вертикальному положенні при їх обробці на багатощабельних свердлильно-фрезерно-розточувальних верстатах із ЧПК. Класифікація на основі конструкторсько-технологічних ознак наведена на рис. 9.

За геометричною формою кутники бувають квадратні (рис. 10 а) або прямокутні (рис. 10 б) [10–18]. За конструкцією кутники поділяються на рамні (рис. 11 а) та твердотільні (рис. 11 б). За кількістю робочих поверхонь кутники можуть бути з однією (рис. 12 а) та двома (рис. 12 б) робочими поверхнями. Дві поверхні забезпечують одночасне установлення двох заготовок.

За просторовим розташуванням кутники бувають похилі та прямі (рис. 13). Похилі регульовані кутники ідеально підходять для установлення заготовок на будь-який кут, що регулюється на величину до 180° і можуть бути встановлені в фіксованих положеннях по вертикалі або по горизонталі.

За розміром робочої поверхні кутники поділяються на низькі (300–450 мм), середні (500–630 мм) та високі (700–800 мм) [14, 18]. Під розміром робочої поверхні для прямокутних кутників мається на увазі найбільша сторона. За масою кутники поділяються на легкі (до 100 кг), середні (100–170 кг) та важкі (більше 170 кг) [14, 18]. Спосіб з'єднання кутників із іншими функціональними елементами здійснюється через отвори (рис. 14 а), які можуть бути гладкі, різьбові та комбіновані, а також через Т-подібні, П-

подібні пази (рис. 14 б), які розташовані поздовжньо, поперечно та взаємно перпендикулярно або одночасно отвори та пази (рис. 14 в).



Рисунок 9 – Класифікація кутників



а)



б)

Рисунок 10 – Класифікація кутників за геометричною формою:

а – квадратна; б – прямокутна



а)

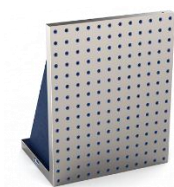


б)

Рисунок 11 – Класифікація кутників за конструкцією:

а – рамна; б – твердотільна

Для виготовлення кутників використовують сталь (12ХН3А, 20Х, А36, С1119), чавун (FC300, FC250, СЧ30) та алюміній (6061) [10–18]. Найбільш розповсюдженим є сірий чавун FC300.



а)



б)

Рисунок 12 – Класифікація кутників за кількістю робочих поверхонь:
а – одна; б – дві



а)



б)

Рисунок 13 – Класифікація кутників за просторовим розташуванням:
а – похилі; б – прямі



а)



б)



в)

Рисунок 14 – Класифікація кутників за способом з'єднання:
а – отвори; б – пази; в – отвори та пази

Куби

Розроблено класифікацію кубів (рис. 15), які призначені для кріплення різних установлювальних та затискних елементів ВП.

Конструктивно куби виготовляють із однією (рис. 16 а, б), трьома (рис. 16 в, г) або п'ятьма (рис. 16 д) робочими поверхнями. За конструкцією куби поділяються на рамні (рис. 16 в) та твердотільні (рис. 16 б). Рамні бувають куби із однією та трьома поверхнями [10–15, 18]. Куби з п'ятьма робочими поверхнями виготовляють тільки твердотільними [16, 17]. За геометричною формою куби поділяються на квадратні (рис. 16 а) та прямокутні (рис. 16 в). За розміром робочої поверхні куби поділяються на малі (85–135 мм), середні (145–200 мм) та великі (210–250 мм). За висотою куби поділяються на низькі (100–120 мм), середні (150–200 мм) та високі (210–250 мм) [11, 14, 15, 18]. Установлення інших функціональних елементів на кубах здійснюється через отвори, які можуть бути гладкі, різбові та комбіновані. Для виготовлення кубів використовують сталь (12ХН3А, 20Х, А36, С1119), чавун (FC300, FC250, СЧ30), алюміній (6061) [10–18].

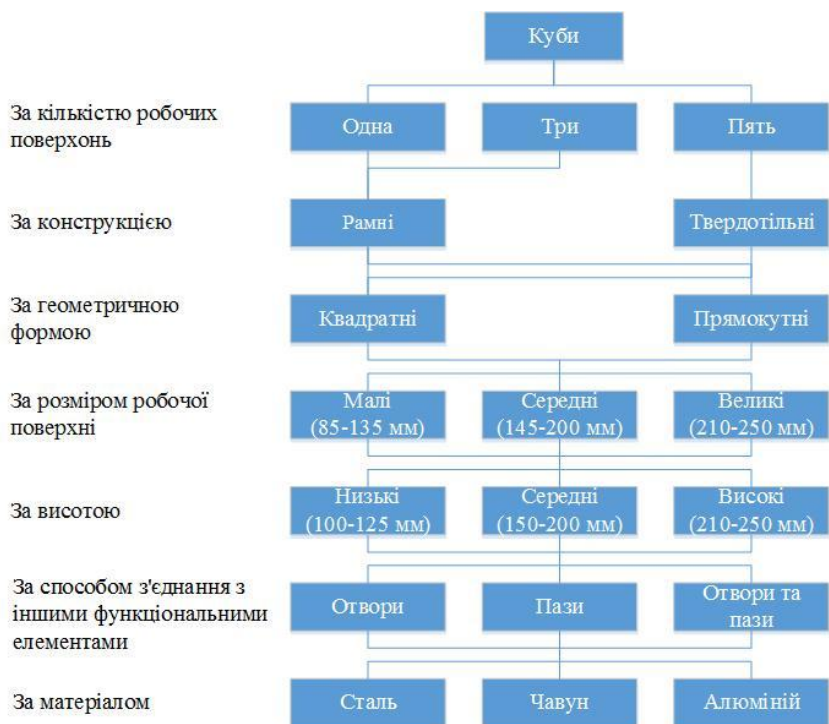


Рисунок 15 – Класифікація кубів

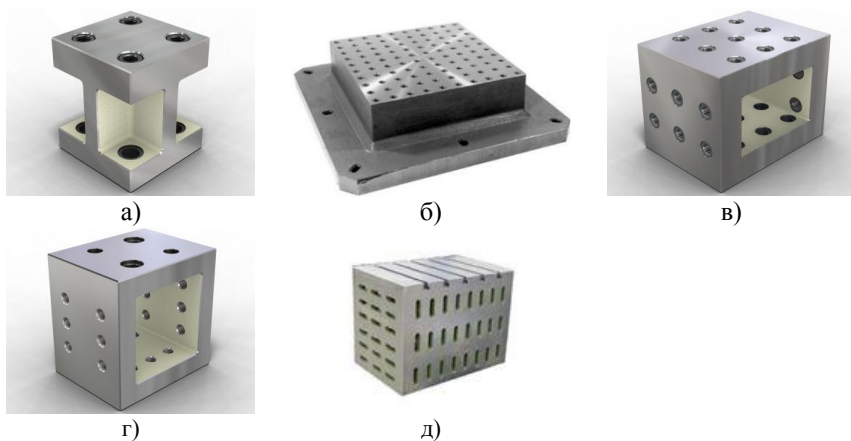


Рисунок 16 – Класифікація кубів за кількістю робочих поверхонь:
а, б – одна; в, г – три; д – п'ять

Висновки

Розглянуто типові конструкції опорних елементів модульних верстатних пристроїв типу колон, плит, кутників і кубів, які використовуються при механічній обробці заготовок на металорізальних верстатах. Розроблена класифікація опорних елементів за конструкторсько-технологічними ознаками, що дозволяє вибрати оптимальні опорні елементи при компонуванні верстатних пристроїв з урахуванням виробничих умов. Дана класифікація покладена в основу бібліотеки опорних елементів верстатних пристроїв, що є елементом бази даних системи автоматизованого проектування верстатних пристроїв [19].

Робота виконана за підтримки МОН України: ДР № 0117U003931 та ДР № 0117002252.

Список використаних джерел: 1. *Карпуть В.Е.* Современные требования к технологической оснастке станков с ЧПУ / В. Е. Карпуть, В. А. Иванов // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – 2008. – № 22. – С. 23–35. 2. *Іванов В.О.* Вибір оптимальних компоновок верстатних пристроїв для верстатів з ЧПК: автореф. дис. на здобуття науч. ступеня канд. техн. наук: спец.05.02.08 «Технологія машинобудування» / В.О. Іванов. – Харків, 2010. – 239 с. 3. *Hoffman E.* Jig and Fixture Design / Edward Hoffman // Cengage Learning, 2003. – 416 p. 4. Jig and Fixture Handbook / Carr Lane Manufacturing Co, 2012. – 430 p. 5. Modular Fixturing Handbook / Carr Lane Manufacturing Company, 1991. – 216 p. 6. *Karpus V., Ivanov V., Dehtiarov I. et al.* Technological Assurance of Complex Parts Manufacturing. In: Ivanov V. et al. (eds.) Advances in Design, Simulation and Manufacturing. DSMIE-2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering, 2019, pp. 51–61, doi: 10.1007/978-3-319-93587-4_6. 7. *Пермяков А. А.* К вопросу об унификации установочно-зажимных приспособлений агрегатированного оборудования / А. А. Пермяков, И. Я. Яковенко // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – 2016. – № 33 (1205). – С. 38–41. 8. *Karpus V.E., Ivanov V.A.* Choice of Optimal Construction of Modular Reusable Fixtures. Russian Engineering Research, 2012, Vol. 32, Issue 3, pp. 213–219, doi: 10.3103/S1068798X12030124. 9. *Ivanov V.* Process-Oriented Approach to Fixture Design. In: Ivanov V. et al. (eds.) Advances in Design, Simulation and Manufacturing. DSMIE-2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering, 2019, pp. 42–50, doi: 10.1007/978-3-319-93587-4_5. 10. Official website of Advanced Machine and Engineering Co [Електронний ресурс] // Advanced Machine and Engineering Co. – 2015. – Режим доступу: <http://www.ame.com>. 11. Official website of Carr Lane Manufacturing [Електронний ресурс] // Carr Lane Manufacturing. – 2018. – Режим доступу: <https://www.carrlane.com>. 12. Official website of TE-CO [Електронний ресурс] // TE-CO. – 2018. – Режим доступу: <http://www.te-co.com>. 13. Official website of Halden Norm+Technik [Електронний ресурс] // Halden Norm+Technik. – 2018. – Режим доступу: http://www.halder.com/eng_de. 14. Official website of Imao Corporation [Електронний ресурс] // Imao Corporation. – 2018. – Режим доступу: http://www.imao.biz/en/product_en.html. 15. Official website of Fixtureworks [Електронний ресурс] // Fixtureworks. – 2018. – Режим доступу: <http://www.fixtureworks.net>. 16. Official website of Abbott Workholding Products [Електронний ресурс] // Abbott Workholding Products. – 2018. – Режим доступу: <http://www.abbottworkholding.com>. 17. Official website of Stevens Engineering, Inc. [Електронний ресурс] // StevensEngineering, Inc. – 2018. – Режим доступу: <http://www.stevenseng.com>. 18. Official website of LEAVE INDUSTRIAL Co. Ltd. [Електронний ресурс] // LEAVE INDUSTRIAL Co. Ltd. – 2018. – Режим доступу: <http://www.leave.com.tw/eng>. 19. Іванов В. О. Структурно-функціональне моделювання процесу проектування верстатних пристроїв / В. О. Іванов, В. Є. Карпуть, С. М. Ващенко, Й. Заяць, А. І. Кармаза // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 17 (1239). – С. 30–37.

Bibliography (transliterated): 1. Karpus V.E. Sovremennyye trebovaniya k tehnologicheskoy osnastke stankov s ChPU / V. E. Karpus, V. A. Ivanov // Visnik Nacionalnogo tehnicnogo universitetu "Harkivskij politehnicnij institut". – 2008. – № 22. – S. 23–35. 2. Ivanov V.O. Vibir optimalnih komponentov verstatnih pristroyiv dlya verstativ z ChPK: avtoref. dis. na zdobuttaya nauch. stupenya kand. tehn. nauk: spec.05.02.08 «Tehnologiya mashinobuduvannya» / V.O. Ivanov. – Harkiv, 2010. – 239 s. 3. Hoffman E. Jig and Fixture Design / Edward Hoffman // Cengage Learning, 2003. – 416 p. 4. Jig and Fixture Handbook / Carr Lane Manufacturing Co, 2012. – 430 p. 5. Modular Fixturing Handbook / Carr Lane Manufacturing Company, 1991. – 216 p. 6. Karpus V., Ivanov V., Dehtiarov I. et al. Technological Assurance of Complex Parts Manufacturing. In: Ivanov V. et al. (eds.) Advances in Design, Simulation and Manufacturing. DSMIE-2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering, 2019, pp. 51–61, doi: 10.1007/978-3-319-93587-4_6. 7. Permyakov A. A. K voprosu ob unifikatsii ustanovочно-zazhimnyh prispособlenij agregatirovannogo oborudovaniya / A. A. Permyakov, I. Ya. Yakovenko // Visnik Nacionalnogo tehnicnogo universitetu "Harkivskij politehnicnij institut". – 2016. – № 33 (1205). – S. 38–41. 8. Karpus V.E., Ivanov V.A. Choice of Optimal Construction of Modular Reusable Fixtures. Russian Engineering Research, 2012, Vol. 32, Issue 3, pp. 213–219, doi: 10.3103/S1068798X12030124. 9. Ivanov V. Process-Oriented Approach to Fixture Design. In: Ivanov V. et al. (eds.) Advances in Design, Simulation and Manufacturing. DSMIE-2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering, 2019, pp. 42–50, doi: 10.1007/978-3-319-93587-4_5. 10. Official website of Advanced Machine and Engineering Co [Elektronnij resurs] // Advanced Machine and Engineering Co. – 2015. – Rezhim dostupu: <http://www.ame.com>. 11. Official website of Carr Lane Manufacturing [Elektronnij resurs] // Carr Lane Manufacturing. – 2018. – Rezhim dostupu: <https://www.carrlane.com>. 12. Official website of TE-CO [Elektronnij resurs] // TE-CO. – 2018. – Rezhim dostupu: <http://www.te-co.com>. 13. Official website of Halden Norm+Technik [Elektronnij resurs] // Halden Norm+Technik. – 2018. – Rezhim dostupu: http://www.halder.com/eng_de. 14. Official website of Imao Corporation [Elektronnij resurs] // Imao Corporation. – 2018. – Rezhim dostupu: http://www.imao.biz/en/product_en.html. 15. Official website of Fixtureworks [Elektronnij resurs] // Fixtureworks. – 2018. – Rezhim dostupu: <http://www.fixtureworks.net>. 16. Official website of Abbott Workholding Products [Elektronnij resurs] // Abbott Workholding Products. – 2018. – Rezhim dostupu: <http://www.abbottworkholding.com>. 17. Official website of Stevens Engineering, Inc. [Elektronnij resurs] // StevensEngineering, Inc. – 2018. – Rezhim dostupu: <http://www.stevenseng.com>. 18. Official website of LEAVE INDUSTRIAL Co. Ltd. [Elektronnij resurs] // LEAVE INDUSTRIAL Co. Ltd. – 2018. – Rezhim dostupu: <http://www.leave.com.tw/eng>. 19. Ivanov V. O. Strukturno-funkcionalne modelyuvannya procesu proektuvannya verstatnih pristroyiv / V. O. Ivanov, V. Ye. Karpus, S. M. Vashenko, J. Zayac, A. I. Karmaza // Visnik NTU «HPI». Seriya: Tehnologiyi v mashinobuduvanni. – H. : NTU «HPI», 2017. – № 17 (1239). – S. 30–37.

Надійшла до редколегії 25.06.2018

УДК 621.74.07

Р.Т. Карпик, канд. техн. наук, С.В. Дідик, магістр, Івано-Франківськ, Україна

АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ПРОЕКТУВАННЯ ПРЕС-ФОРМ ДЛЯ ЛИТВА ТЕРМОПЛАСТИВ ПІД ТИСКОМ

Проведено аналіз потенційних можливостей та функцій систем автоматизованого проектування. На основі створеної моделі деталі у середовищі Autodesk Inventor показано процес розробки прес-форм для литва із врахуванням технологічних особливостей та проведено симуляцію процесів заливки з подальшим прогнозом якості виливків, що дозволяє спростити та суттєво пришвидшити процеси: проектування прес-форми, здійснення аналізу ливарної порожнини та розроблення керуючих програм для обробки деталей на верстатах з ЧПК.

Ключові слова: прес-форма, термопласти, литво пластмас під тиском, Autodesk Inventor, підготовка виробництва.

Проведен анализ потенциальных возможностей и функций систем автоматизированного проектирования. На основе созданной модели детали в среде Autodesk Inventor показан процесс разработки пресс-форм для литья с учетом технологических особенностей и проведено симуляцию процессов заливки с последующим прогнозом качества отливок, что позволяет упростить и существенно ускорить процессы: проектирования пресс-формы, осуществления анализа литейной полости и разработки управляющих программ для обработки деталей на станках с ЧПУ.

Ключевые слова: пресс-форма, термопласты, литье пластмасс под давлением, Autodesk Inventor, подготовка производства.

The analysis of potential possibilities and functions of computer-aided design systems is carried out. Based on the created part model, the Autodesk Inventor environment demonstrates the process of developing molds for molding taking into account technological features, and the simulation of the casting processes was carried out, followed by a forecast of the quality of the castings, which makes it possible to simplify and substantially accelerate the processes: mold design, analysis of the casting cavity and development of control programs for machining of parts on CNC machines.

Keywords: mold, thermoplastics, plastic injection molding, Autodesk Inventor, preparation of production.

Постановка проблеми

На даний момент у світі дуже велика кількість деталей і виробів виготовляється литтям пластмас, для проведення якого потрібно сконструювати оснастку – прес-форму. Для проектування прес-форм чи їхніх деталей використовують CAD-системи (Computer Aided Design), з подальшим використанням CAM-систем (Computer Aided Manufacturing), які служать для технологічної підготовки виробництва. Розрахунок основних деталей та вузлів проводиться в CAE-системах (Computer Aided Engineering) [1-4]. Проте далеко не всі вони є комплексним інструментом і поєднують в собі можливості створювати деталь, проектувати форму для неї, перевіряти її міцнісні характеристики та симулювати заливання і прогнозувати якість кінцевого виливка. Зазвичай якогось з вище вказаних пунктів в поширених програмах немає, тому завжди доводиться використовувати декілька

програмних продуктів, що вимагає додаткових затрат на програмне забезпечення. Також при експорті-імпорті моделей потрібно використовувати файли однакового розширення, що не завжди можливо, крім того файли з перехідним розширенням можуть призводити до неточностей у моделі.

Різного виду систем автоматизованого проектування (САПР) є доволі багато, проте далеко не всі вони є у вільному доступі для ознайомлення, а їхні інтерфейси є вельми складними, тому для їх використання потрібно як мінімум ознайомитися зі всіма інструкціями виробника програмного продукту. Наявна технічна література та інструкції, що в даний час існують також не завжди доступні загалом і в більшості випадків написані англійською мовою, і насичена вузькоспеціалізованою термінологією, яку важко коректно перекласти, а тому вимагає багато часу для вивчення. Однією з найбільш доступних і пристосованих для проектування прес-форм для литва пластикових деталей є програмний комплекс Autodesk Inventor.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Сучасне виробництво характеризується багатою номенклатурою деталей, які виготовляються, з великою зміною виробів, що випускаються. При цьому САПР стали невід'ємною частиною виробничого процесу та актуальним напрямом вдосконалення технологічної підготовки виробництва, що забезпечує високу якість та ефективність проектування [3, 4]. Розробка та вдосконалення системи автоматизованого проектування технологічної оснастки дозволяє скоротити терміни технологічної підготовки виробництва і зменшити собівартість виробів, що випускаються [5-8].

Основою автоматизації проектування технологічної оснастки (пристосувань, штампів, прес-форм тощо) є максимальна стандартизація і уніфікація їх елементів та систематизація проектних рішень [9, 10].

Метою роботи є демонстрація технологічних можливостей САПР Autodesk Inventor для створення моделей пластикових деталей та проектування прес-форм, для їх лиття, на базі цих моделей із подальшим випробовуванням елементів прес-форми, перевірки та аналізу кінцевого виливка на предмет якості та відповідності усім вимогам.

Обґрунтування автоматизації проектування прес-форм для виготовлення литтям деталей із термопластів у Autodesk Inventor

Метою автоматизації проектних робіт є насамперед скорочення тривалості проектування та зменшення витрат на проектування. Це дозволяє зменшити час на проектування та випробування розробленого оснащення ще на стадії підготовки виробництва.

В цілому процес проектування можна охарактеризувати такими кроками (рис. 1).

Рациональний поділ функцій під час автоматизованого проектування прес-форм між людиною та програмою – одна з найважливіших проблем, яку вирішують при використанні EOM для автоматизації проектно-

конструкторських робіт. Залежно від проектного об'єкта, ступеня можливої формалізації процесу його проектування, наявної технічної та програмної бази, проектну задачу можна реалізувати різними шляхами, але наявність розвинутого програмного забезпечення зовсім не гарантує спрощення процесу проектування до натискання кількох кнопок та відсутності потреби у кваліфікованому і креативному мисленні з боку інженера. Проте середовище для проектування Autodesk Inventor дозволяє максимально спростити процес розробки оснастки і скоротити затрати часу.

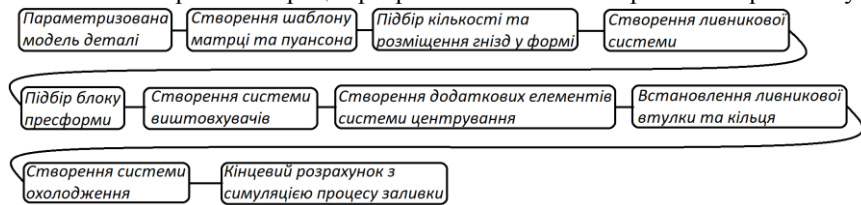


Рисунок 1 – Блок-схема послідовності процесу розробки прес-форми

Початковими даними для проектування прес-форми служать:

- креслення деталі з технічними вимогами та відомостями про її призначення;
- матеріал з якого виготовляють деталь та його властивості (далеко не останню роль відіграють реологічні властивості пластмаси);
- технічні характеристики обладнання (термопластавтомата), на якому проводитимуть процес литва;
- інші технічні та технологічні фактори, які слід враховувати під час виконання проектних робіт.

У процесі проектування вибирають раціональні конструкції, проводять перевірки на міцність та розробляють робочі кресленники всіх деталей прес-форми, прогнозують потенційну якість деталі.

Система Autodesk Inventor дозволяє виконувати такі операції:

- створення параметризованої моделі деталі;
- вибір матеріалу деталі з власної бази даних;
- аналіз ухилів площин деталі;
- автоматичний підбір та створення ливників та ливникових каналів;
- обчислення усадки поверхонь деталі залежно від вибраного матеріалу;
- проектування блоків прес-форм: систем «колонка-втулка», пази в плитах та транспортні деталі за даними бібліотеки;
- проектування пуансонів;
- розрахунок конструктивних розмірів матриці;
- підбір та розміщення кріпильних елементів на складальному кресленнику;
- проектування систем: фіксації, виштовхування та охолодження прес-форми;

- проектування додаткових деталей типу плит (підкладок: верхня та нижня, пуансонотримач);
- проектування хвостовиків;
- формування креслень (деталей блока, пакета та додаткових деталей);
- розрахунок маси; '
- прогнозування якості деталі;
- формування специфікації та ряд інших функцій.

У сукупності всі ці функції надають конструктору необмежені можливості в плані створення деталей та оснастки. При цьому відпадає необхідність у громіздких та надлишкових розрахунках, що займають багато часу. Навіть дрібна помилка в подібних розрахунках може призвести до викривлення кінцевого результату, а це тягне за собою втрати часу та ресурсів, тому САПР на даний час дозволяють уникнути подібних помилок, адже велика частина обчислень переноситься на машину. Крім того, велика база інженерних даних дозволяє підібрати оптимальні рішення для конкретних задач, що дозволяє економити час.

Номенклатура деталей з пластмас, яку потрібно виготовити литвом у прес-форми під тиском на малих підприємствах може бути різноманітною, що вимагає мінімальної тривалості підготовки виробництва для виготовлення виробу з відсутністю помилок і скороченням тривалості проектування, що може бути досягнуто при використанні САПР, але фактором, який стримує їх впровадження на підприємствах, є висока вартість таких програмних продуктів. Отже, набір можливостей САПР для застосування на підприємстві має відповідати наявному типу виробництва, складності та номенклатурі виробів та обладнання і необхідності проведення розрахунків у процесі проектування для зменшення витрат на впровадження САПР та отримання результатів від її використання за відносно короткий термін.

Процес проектування прес-форми розчленований на три етапи. На першому здійснюється створення або імпортування параметризованої 3D-моделі деталі (рис. 2), яку виливатимуть у прес-формі та її всебічну перевірку на технологічність і відповідність усім технічним вимогам (рис. 3). Якщо у моделі немає помилок, то відбувається перехід до другого етапу – проектування самої прес-форми на базі уже готової моделі деталі, а при наявності помилок вносять відповідні корективи у початкові дані.

Багато рутинних обчислень та підборів на другому етапі можна віддати самій системі Inventor (розрахунки усадок, раціональних температурних параметрів процесу лиття тощо). Проте це не означає, що для конструктора все зводиться до натискання кількох кнопок, адже він повинен провести підбір взаємного розміщення гнізд в прес-формі, типу та виду ливникової системи та системи охолодження тощо. Результатом другого етапу є ряд графіків симуляції заливки деталей у прес-формі, прогноз якості кінцевого виливка (рис. 4) та модель блоку прес-форми у збірці (рис. 5), яку практично

легко можна перетворити в кінцеві технологічні кресленики, а моделі окремих деталей використати як вихідні при розробленні керуючих програм для їх обробки на верстатах з ЧПК.

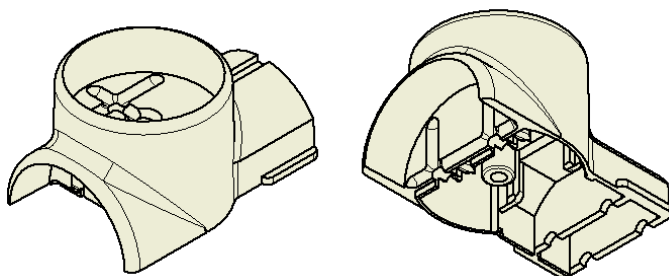


Рисунок 2 – 3D-модель деталі

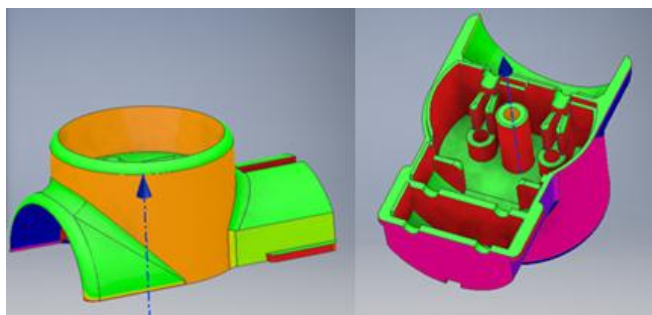


Рисунок 3 – Приклад виконання графічного аналізу ухилів: зелений та оранжевий колір – раціональні кути нахилу; червоний – строго перпендикулярні поверхні

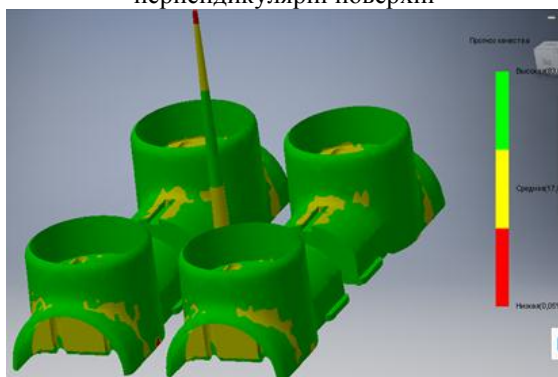


Рисунок 4– Графік прогнозування якості виливка: зелений – висока; жовтий – середня; червоний – низька

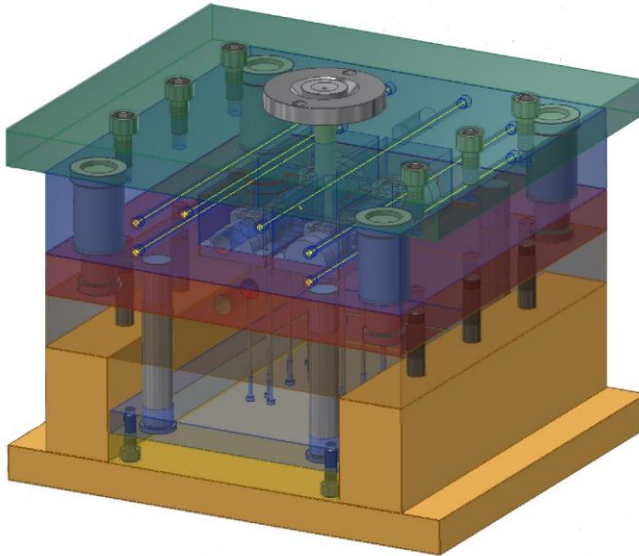


Рисунок 5 – Загальний вигляд готового блоку прес-форми

Під час третього етапу проводять випробування раніше створених деталей прес-форми на міцність та стійкість. Достатньо завантажити деталь або певну збірку в середовище для випробування, створити новий експеримент і задати всі необхідні умови закріплення, взаємного розміщення та навантаження, які діють на модель. Система проведе обчислення всіх потрібних параметрів і видасть результати у формі графіків та таблиць. На рис. 6 показано напруження за Мізесом у матриці прес-форми.

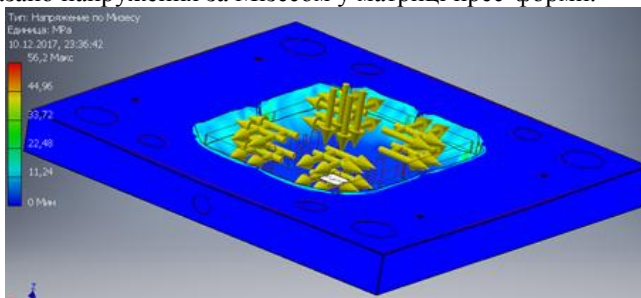


Рисунок 6 – Напруження за Мізесом у матриці

Висновки

Проектування прес-форми для лиття деталей зі складними поверхнями є складним і довготривалим процесом, від якості якого залежить подальше її виготовлення. Застосування сучасних програмних продуктів дозволяє

спростити та суттєво пришвидшити процеси: проектування прес-форми, здійснення аналізу ливарної порожнини та розроблення керуючих програм для оброблення деталей на верстатах з ЧПК.

Список використаних джерел: 1. Глинских А. Мировой рынок CAD/CAM/CAE-систем. – Компьютер-Информ № 01 (117), 2002. 2. Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования: учебник для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 430 с. 3. Рыбаков А.В. Создание автоматизированных систем в машиностроении: [учеб. пособие] / Рыбаков А.В., Евдокимов С.А., Мелешина Г.А. – М.: Изд-во "Станкин", 2001. – 157с. 4. Мазеин П.Г., Шаламов А.В. Сквозное автоматизированное проектирование в CAD/CAM системах: учебное пособие. – Челябинск : Изд-во ЮУрГУ, 2002. – 83 с. 5. Суберляк О. В. Технологии переработки полимерных та композиционных материалов: підруч. [для студ. виш. навч. закл.] / О. В. Суберляк, П.І. Баштаннык. – Львів : Растр-7, 2007. – 375 с. 6. Основы технологии переработки пластмасс: учебник для вузов / С.В. Власов. Л.Б. Кандырин. В. Н. Кулезнев и др. – М.: Химия, 2004. – 600 с. 7. Мэллой Р. А. Конструирование пластмассовых изделий для литья под давлением / Р. А. Мэллой ; пер. с англ. яз. под ред. В. А. Брагинского, Е. С. Цобкалло, Г. В. Комарова. – СПб.: Профессия, 2006. – 512 с. 8. Литье под давлением / М. Б. Беккер, М. Л. Заславский. Ю. Ф. Игнатенко и др. – 3-е изд., перераб. и доп. М. Машиностроение, 1990, – 400 с. 9. Видгоф Н. Б. Основы конструирования литьевых форм для термопластов / Н. Б. Видгоф. – М.: Машиностроение, 1979. – 264 с. 10. Основы конструирования и расчета деталей из пластмасс и технологической оснастки для их изготовления / Мирзгоев Р. Г., Брагинский В.А. и др. – Ленинград: 1972 – 416 с.

Bibliography (transliterated): 1. Glinskih A. Mirovoy ryinok CAD/CAM/CAE-sistem. – Kompyuter-Inform № 01 (117), 2002. 2. Norenkov I.P. Osnovy avtomatizirovannogo proektirovaniya: uchenik dlya vuzov. – 4-e izd., pererab. i dop. – M.: Izd-vo MG TU im. N.E. Bauman, 2009. – 430 s. 3. Ryibakov A.V. Sozdanie avtomatizirovannykh sistem v mashinostroenii: [ucheb. posobie] / Ryibakov A.V., Evdokimov S.A., Meleshina G.A. – M.: Izd-vo "Stankin", 2001. – 157s. 4. Mazein P.G., Shalamov A.V. Skvoznnoe avtomatizirovannoe proektirovanie v CAD/CAM sistemah: uchebnoe posobie. – Chelyabinsk : Izd-vo YuUrGU, 2002. – 83 s. 5. Suberlyak O. V. Tehnologiya pererobki polimernih ta kompozitsiynih materialiv: pldruch. [dlya stud. vnsch. navch. zakl.] / O. V. Suberlyak, P.I. Bashtannik. – Lviv: Rastr-7, 2007. – 375 s. 6. Osnovy tehnologii pererabotki plastmass: uchebnyk dlya vuzov / S.V. Vlasov. L.B. Kandyirin. V. N. Kuleznev i dr. – M.: Himiya, 2004. – 600 s. 7. Melloy R. A. Konstruirovanie plastmassovykh izdeliy dlya litya pod davleniem / R. A. Melloy; per. s angl. yaz. pod red. V.A. Braginskogo, E.S. Tsobkallo, G.V. Komarova. – SPb.: Professiya, 2006. – 512 s. 8. Lite pod davleniem / M. B. Bekker, M. L. Zaslavskiy. Yu. F. Ignatenko i dr. – 3-e izd., pefrab. i dop. M. Mashinostroenie, 1990, – 400 s. 9. Vidgof N. B. Osnovy konstruirovaniya litevykh form dlya termoplastov / N.B. Vidgof. – M.: Mashinostroenie, 1979. – 264 s. 10. Osnovy konstruirovaniya i rascheta detaley iz plastmass i tehnologicheskoy osnastki dlya ih izgotovleniya / Mirzgoev R.G., Braginskiy V.A. i drugie. – Leningrad: 1972 – 416 s.

Надійшла до редколегії 25.06.2018

УДК 621.9.025

А. С. Манохин, канд. техн. наук, В.А. Столбовой канд. техн. наук,
Закиев И. М., канд. техн. наук, С. А. Клименко, д-р. техн., наук,
Береснев В. М., д-р. техн., наук, С. Ан. Клименко, канд. техн. наук,
Найденко А.Г., канд. техн. наук, Закиев В. И.,
Ю. А. Мельничук, канд. техн. наук, М. Ю. Копейкина, канд. техн. наук,
Киев, Харьков, Украина

ВЛИЯНИЕ ПОДГОТОВКИ РЕЖУЩИХ ПЛАСТИН ИЗ PcBN ПОД НАПЫЛЕНИЕ НА АДГЕЗИОННУЮ ПРОЧНОСТЬ В СИСТЕМЕ «ПОКРЫТИЕ-ОСНОВА» И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИНСТРУМЕНТА

Рассмотрено влияние подготовки режущих пластин под напыление на адгезионную прочность и эксплуатационные характеристики инструмента

Ключевые слова: режущие пластины, напыление покрытий, эксплуатационные характеристики

Розглянуто вплив підготовки ріжучих пластин під напилення на адгезійну міцність і експлуатаційні характеристики інструменту

Ключові слова: ріжучі пластини, напилення покриттів, експлуатаційні характеристики

The influence of the preparation of cutting inserts on the deposition on the adhesive strength and performance characteristics of the tool

Key words: cutting inserts, spraying of coatings, performance characteristics

Введение

Нанесение покрытий на режущий инструмент позволяет существенно увеличить стойкость и/или производительность режущих инструментов. В настоящее время подавляющее большинство сменных неперетачиваемых твердосплавных режущих пластин выпускается с различными типами PVD или CVD защитными покрытиями. Разработка и создание покрытий для режущих инструментов с рабочей частью из поликристаллического кубического нитрида бора (PcBN) также является актуальной задачей [1]. Учитывая, что покрытие должно снижать интенсивность изнашивания режущего инструмента из сверхтвердого композита вследствие абразивно-механического истирания его контактных поверхностей, твердость покрытия должна быть весьма высока. Перспективным методом получения покрытий с твердостью 40–80 ГПа является вакуумно-дуговое осаждение. Высокая твердость таких покрытий обусловлена, в первую очередь, их структурой с высокой плотностью межзеренных и межфазных границ и характерными размерами структурных элементов (зерен, слоёв и т.п.) не более 100 нм. При этом нанесение покрытий высокой твердости на режущие пластины из PcBN связано с рядом проблем. В частности, адгезионная прочность покрытий,

нанесенных на основу из PсBN, при прочих равных условиях, более чем в два раза ниже, в сравнении с покрытиями, напыленными на основу из твердого сплава или стали [2]. Для повышения прочности адгезионной связи в качестве переходного подслоя между инструментальной основой и нитридным PVD-покрытием наносится слой Ti [3], TiN или CrN [4] (в зависимости от химического состава основного слоя покрытия) толщиной до 100 нм. Кроме того, металлический подслоя снижает внутренние напряжения в покрытии, а именно, при толщине подслоя Ti, равной 20 % от толщины покрытия TiN, внутренние напряжения в последнем уменьшаются в 2–3 раза [5], что повышает прочность сцепления с подложкой и снижает вероятность растрескивания покрытий с последующей их деламинацией. Также возможна предварительная обработка ионами металлов (например, Cr^+) в газовой атмосфере (Ar) с образованием зоны имплантации в приповерхностном слое инструментальной основы при последующем нанесении базового нитридного слоя (CrN), соответствующего первому из слоев в многослойной системе основной части покрытия [6].

Целью настоящего исследования являлся анализ влияния способов подготовки поверхности режущих пластин из PсBN перед нанесением защитного покрытия на адгезионную прочность в системе «покрытие-основа» и эксплуатационные характеристики режущего инструмента с покрытием.

Для этого на режущие пластины из PсBN наносилось нанослойное покрытие (TiAlSiY)N/CrN. Перед нанесением покрытия производилась бомбардировка поверхностей пластин ионами азота или аргона, а также на них наносился подслоя хрома.

Методика

На рис. 1. показана схема модернизированной вакуумно-дуговой установки типа «БУЛАТ-6» с устройством для получения нанослойных покрытий (рис. 1). Для этого вакуумная камера 1 обеспечена системой автоматического поддержания давления азота (аргона) 5 и испарителями 2, 8, 12. На поворотном устройстве камеры размещался держатель 4. В центре держателя размещались напыляемые режущие пластины 6. В установке установлен источник постоянного напряжения 10. Размер отрицательного постоянного напряжения, подаваемого на напыляемые пластины регулировался от 20 до 1300 В.

Поворотная система держателя и источника питания дуги в испарителях 8, 12 связаны с устройством для автоматического управления нанесением многослойных нанокompозитных покрытий 11. Устройство обеспечивает два режима работы, которые соответствуют алгоритмам управления испарителями, а также имеется электродвигатель вращения держателя [7].

Напыление производилось на режущие пластины типоразмера RNUN-070300 из PсBN «борсинит» – (95–97) % cBN+(3–5) % Si_3N_4 .

Пластины предварительно промывали щелочным раствором в ультразвуковой ванне, а затем нефрасом С2-80/120. Вакуумную камеру 1 откачивали до давления $P = 1,3 \cdot 10^{-3}$ Па и проводили ионную очистку с активацией поверхности пластин бомбардировкой ионами азота (аргона) в газовой плазме двухступенчатого разряда. РсВN является диэлектриком, поэтому очистка и нагрев в вакууме выполнялись за счет газовой плазмы, для чего использовался газовый двухступенчатый разряд.

Для создания газового разряда в рабочем объеме камеры включен испаритель 2, создающий газо-металлическую плазму, которая через экран 3 является эмиттером электронов для газового разряда в объеме рабочей камеры 1. При подаче на корпус вакуумно-дугового испарителя 7 положительного потенциала переключателем 9 от источника питания дуги в присутствии азота (аргона) при давлении 0,05–0,50 Па в рабочем объеме камеры возникает газовый двухступенчатый разряд.

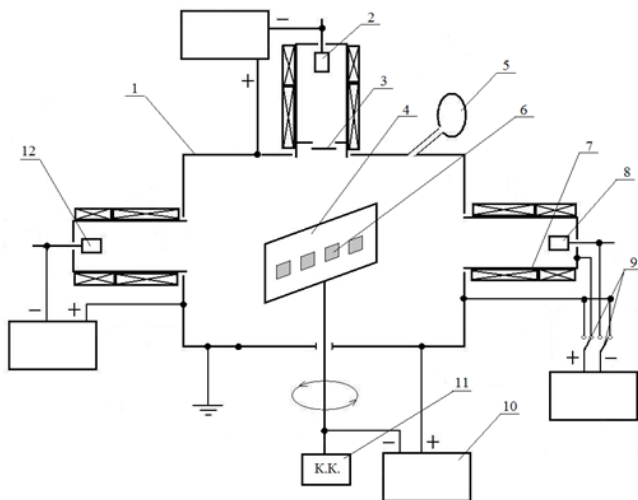


Рисунок 1 – Принципиальная схема вакуумно-дуговой установки типа «БУЛИАТ-6»:

- 1 – вакуумная камера; 2 – вакуумно-дуговой испаритель; 3 – металлический экран;
 4 – экран-держатель; 5 – регулятор давления азота; 6 – напыляемые пластины;
 7 – корпус вакуумно-дугового испарителя – анод для газового разряда; 8 – катод Cr;
 9 – реле переключения; 10 – источник постоянного напряжения;
 11 – командо-контроллер; 12 – катод TiAlSiY

При подаче на подложку 4, а следовательно, и на образцы 6 высокого отрицательного потенциала $-(500\text{--}1300)$ В происходит ее разогрев за счет бомбардировки ионами азота (аргона) до температуры $(480\text{--}540)$ °С, что обеспечивает процессы очистки и нагрева напыляемых пластин. Их температура в дальнейшем поддерживается изменением величины отрицательных

потенциалов (постоянного 10 и импульсного 12). Продолжительность процесса ионной очистки в газовой плазме зависит от необходимого времени для активации очистки поверхности и нагрева пластин. После очистки, для улучшения адгезионных свойств системы «покрытие-основа», на поверхность пластин наносился подслоя хрома. После этого одновременным включением испарителей и подачи в камеру азота на напыляемые пластины подавался постоянный потенциал -280 В и наносился первый слой CrN с одной стороны, а с противоположной – TiAlSiYN. Время обработки каждого слоя – 2 сек, общее время напыления – 1 час. Ток дуги в процессе осаждения составлял 90 А, давление азота в камере 0,465 Па, расстояние от испарителя к подложке – 500 мм, температура пластин (450–520) °С. Варианты подготовки режущих пластин под напыление представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Подготовка режущих пластин из PcBN под напыление

Вариант			
1	2	3	4
Ионная очистка в газовой плазме азота (20 мин); нанесение подслоя хрома (50 нм)	Ионная очистка в газовой плазме азота (20 мин)	Ионная очистка в плазме хрома (20 мин); нанесение подслоя хрома (50 нм)	Ионная очистка в газовой плазме аргона (20 мин); нанесение подслоя хрома (50 нм)

Для измерения адгезионной прочности в системе «покрытие-основа» использовался универсальный hardness/scratch тестер «Micron-gamma», блок-схема которого показана на рис. 2 [8].

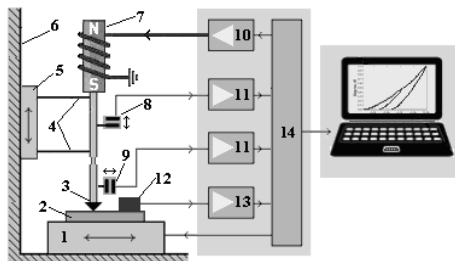


Рисунок 2 – Блок-схема универсального hardness/scratch тестера «Micron-gamma»

Прибор «Micron-gamma» предназначен для оценки микромеханических характеристик материалов методами непрерывного вдавливания и царапания индентором и состоит из моторизованного предметного стола 1, на котором устанавливается исследуемый образец 2. Стол перемещается с постоянной скоростью 22 мкм/с относительно индентора 3. Индентор 3 со штоком прикреплен посредством двух мягких плоских пружин 4 к направляющей 5,

которая может перемещаться по вертикали относительно корпуса 6. Нагружается индентор электромагнитным нагрузителем 7, который подключен к ЦАП 10. Нормальные и тангенциальные перемещения индентора измеряются, соответственно, датчиками 8 и 9, которые подключены к АЦП 11. Дополнительно, на предметный стол может устанавливаться пьезоэлектрический датчик 12 с усилителем 13 для регистрации акустических сигналов. Регистрация и управление осуществляется микроконтроллером 14, подключенным к компьютеру. Чувствительность датчиков составляет 5 нм. Максимальная нагрузка на индентор, развиваемая нагрузителем 7, составляет 5 Н (500 гс).

Прибор позволяет задавать любой закон нагружения при одновременном перемещении образца. Для регистрации профилограммы поверхности нагрузка на индентор минимальна ($P = 0,1$ г, рис. 3, а, в). При прогрессивном царапании, когда нагрузка P плавно увеличивается, а затем плавно уменьшается (рис. 3, б), можно регистрировать нормальную и тангенциальную составляющие перемещения индентора. В режиме линейного царапания поверхность образца подвергается постоянной нагрузке ($P = \text{const}$, рис. 3, г).

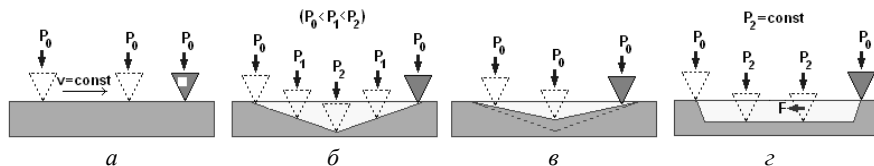


Рисунок 3 – Модельная схема, поясняющая режимы царапания образцов

Испытания инструментов, оснащенных режущими пластинами с наноструктурными покрытиями, проводились при продольном безударном точении заготовок из стали ХВГ, закаленной до 53 ± 2 HRC. Режимы резания: $S = 0,14$ мм/об, $t = 0,2$ мм, $v = 110$ м/мин; геометрические параметры инструмента: $\gamma = -10^\circ$, $\alpha = 10^\circ$. После каждого прохода (3 минуты), износ инструмента по задней поверхности фиксировался USB-микроскопом, установленным на станине станка.

Экспериментальные результаты

Микротвердость и модуль Юнга покрытий измеряли методом непрерывного внедрения в напыленные пластины индентора Берковича при нагрузке 50 гс со скоростью нагружения 5 гс/с. Усредненные по 10-ти измерениям диаграммы приведены на рис. 4. Результаты измерений представлены в табл. 2.

Для измерения адгезионной прочности покрытия производилось его прогрессивное царапание в три этапа с одновременной регистрацией вертикальных перемещений индентора.

На первом, при нагрузке 0,1 гс, регистрировался исходный профиль поверхности (рис. 5, кривая 1).

Вернувшись в исходную позицию, производилось прогрессивное царапание с регистрацией диаграммы вертикальных перемещений индентора (рис. 5, кривая 2) – склерограммы. Максимальная нагрузка в середине трассы ~240 гс (рис. 5, кривая 4). Для точного определения момента разрушения одновременно регистрировался акустический сигнал (рис. 5, осциллограмма 5), возникающий при нагружении покрытия индентором.

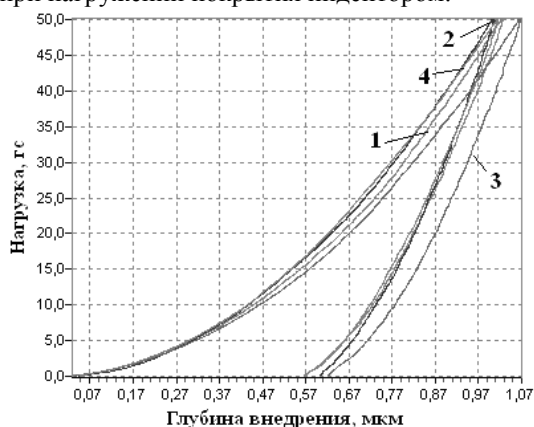


Рисунок 4 – Диаграммы внедрения индентора Берковича в покрытия на пластинах, подготовленных по вариантам, представленным в табл. 1

В заключение, из исходной позиции регистрировалась профилограмма царапины, образовавшейся при нагрузке 0,1 гс (рис. 5, кривая 3).

Как видно из рис. 5, определение величины адгезионной прочности покрытия по координате начала зоны хрупкого разрушения на микрофотографии не позволяет получить достоверный результат, поскольку сама зона разрушения распространяется в направлении, обратном перемещению индентора, по уже нагруженному участку царапины. Для оценке адгезионной прочности покрытий высокой твердости при прогрессивном сканировании индентором критическое значение нагрузки может быть определено в результате анализа сигнала акустической эмиссии.

Для оценки толщины покрытия выполнены исследования по изнашиванию напыленных пластин стальным шариком диаметром 24 мм в суспензии масла, содержащей 20 % алмазного порошка АСМ 2/1, методом «calo-test» [9]. Двухмерное изображение участка перехода «покрытие-пластина РсBN» лунки износа, полученное на бесконтактном интерференционном профилометре «Micron-alpha» [10], приведены на рис. 6. Ступенчатый характер разрушения имеет место для пластин с покрытиями, подготовленных под напыление по вариантам 1 и 3 (рис. 6, б), тогда как у

пластин с покрытиями, подготовленных по вариантам 2 и 4, износ плавный (рис. 6, в), почти нет ступеньки перехода на краю покрытия, что свидетельствует о хорошей адгезии.

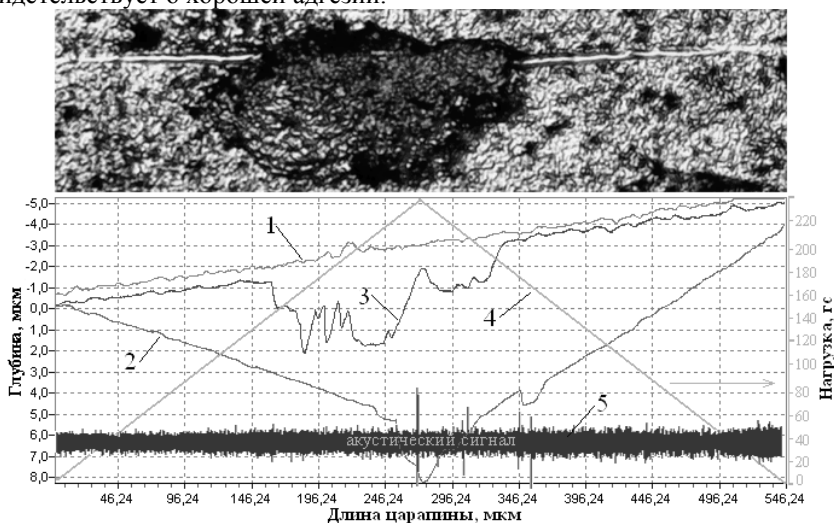


Рисунок 5 – Кривые прогрессивного сканирования покрытия индентором Берковича и микрофотография царапины: 1 – профилограмма исходной поверхности; 2 – склерограмма при максимальной нагрузке 240 гс; 3 – профилограмма образовавшейся царапины; 4 – кривая нагружения; 5 – осциллограмма акустического сигнала

Толщины исследованных покрытий приведены в табл. 2.

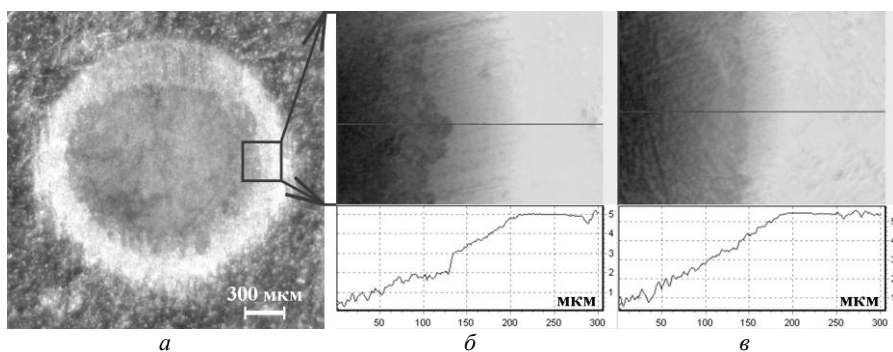


Рисунок 6 – Характерный вид лунки износа на пластине с покрытием после испытаний методом «calo-test» и 2D топографии с профилограммами края лунки износа: а – микрофотография лунки; б, в – пластины, подготовленные под напыление по вариантам 1, 3 и 2, 4 соответственно

Внешний вид инструментов с изношенными контактными участками показан на рис. 7. Наибольшие участки деламинации покрытия, выходящие далеко за пределы контактных зон инструмента со стружкой и обрабатываемым изделием, наблюдаются на инструменте, оснащем пластинкой, подготовленной под напыление по варианту 1, при этом покрытие скалывается с передней и задней поверхностей инструмента (рис. 7 и 8 а, б). В случае подготовки пластины по варианту 3, площадь сколов покрытия несколько меньше. Покрытия на пластинах из PcBN , подготовленных под напыление по вариантам 2 и 4, при нагружении инструмента в зоне резания демонстрируют наилучшее сцепление с основой – площадки разрушения покрытий ограничены только контактными участками инструментов и соответствуют минимальной ширине их фасок износа h_3 .

Как видно, для инструментов, оснащенных пластинами, подготовленными под напыление по вариантам 1 и 3, величина адгезионного сцепления покрытия с основой из PcBN явно недостаточна, чтобы противостоять касательным контактным напряжениям на рабочих участках, и большие участки покрытия удаляются с поверхности пластины уже на начальном этапе обработки (рис. 7 а, б).

Таблица 2 – Результаты измерений

Вариант	Микротвердость H , ГПа	Модуль Юнга E , ГПа	Адгезионная прочность P , гс	Толщина покрытия h , мкм
1	31,8	350	170	4,0±0,1
2	32,3	391	210	4,1±0,1
3	28,7	335	180	3,9±0,1
4	32,9	351	200	4,0±0,1

Очевидно, что в связи с деламинацией покрытий на пластинах, подготовленных под напыление по этим вариантам, величина стойкости инструмента с покрытием соответствует стойкости инструмента из PcBN без покрытия. Напротив, инструменты, оснащенные пластинами с покрытиями, подготовленными под напыление по вариантам 2 и 4, демонстрируют существенно более низкую интенсивность изнашивания. Близкие значения интенсивности изнашивания, несмотря на некоторое различие в значениях адгезионной прочности и характере разрушения покрытий при скрэтч-тестах, свидетельствуют о том, что методы подготовки пластин перед нанесением покрытий обусловили достаточные для условий данного эксперимента прочности сцепления в системах «покрытие-основа из PcBN ».

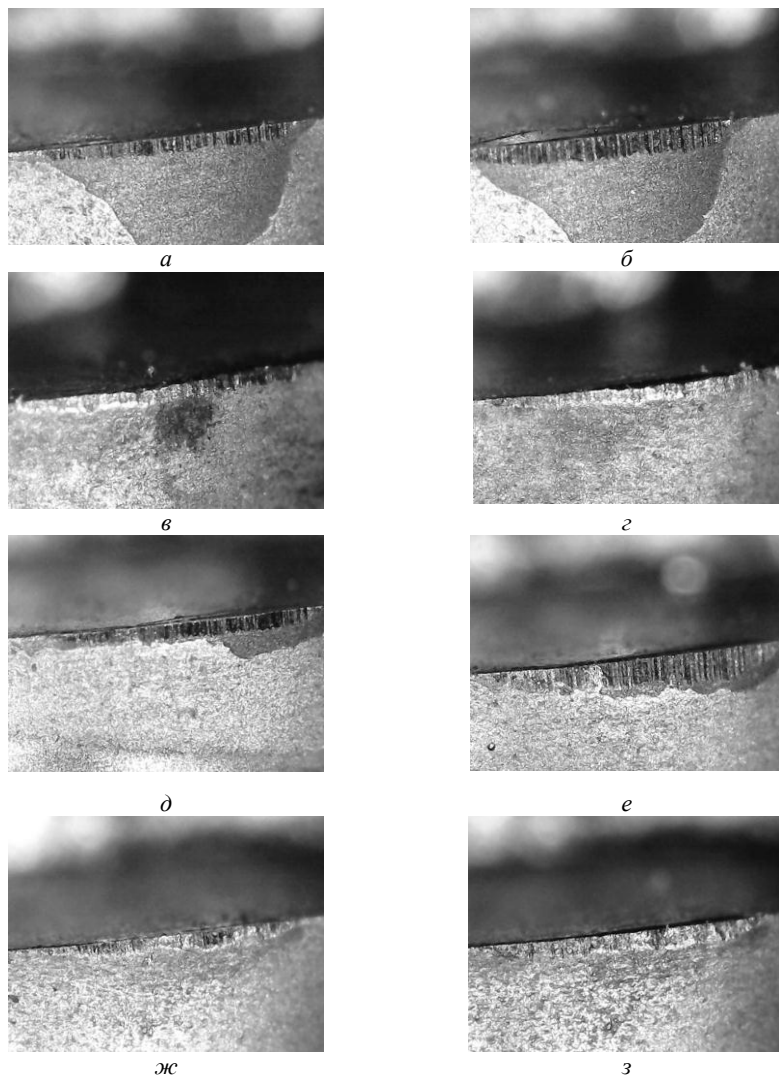


Рисунок 7 – Контактные участки инструментов со стороны задней поверхности.

Режущие пластины подготовлены под напыление по варианту: *a* – 1 ($\tau = 3$ мин);

б – 1 ($\tau = 6$ мин); *в* – 2 ($\tau = 3$ мин); *г* – 2 ($\tau = 9$ мин); *д* – 3 ($\tau = 3$ мин);

е – 3 ($\tau = 9$ мин); *ж* – 4 ($\tau = 3$ мин); *з* – 4 ($\tau = 9$ мин).

Сравнительная диаграмма на рис. 9 демонстрирует величины фасок износа на задней поверхности тестируемых инструментов после 9 минут резания. При подготовке пластины из PcBN по варианту 1, ионная очистка в газовой плазме азота обеспечивала нагрев ее поверхности до температуры

450 °С. В этом случае адгезия многослойного покрытия TiAlSiYN/CrN с инструментальной основой из PcBN была низкая, чем у при подготовке пластины по варианту 2, когда нагрев ее поверхности достигал 500 °С. В настоящее время вакуумная очистка ионами хрома считается самой оптимальной, т.к. ионы хрома хорошо распыляют обрабатываемые поверхности и одновременно внедряются в приповерхностный слой режущих пластин. Однако, как видно из рис. 9, методика очистки ионами Cr не позволяет достичь оптимальных адгезионных свойств между покрытием и основой из PcBN, подготовленной по варианту 3.

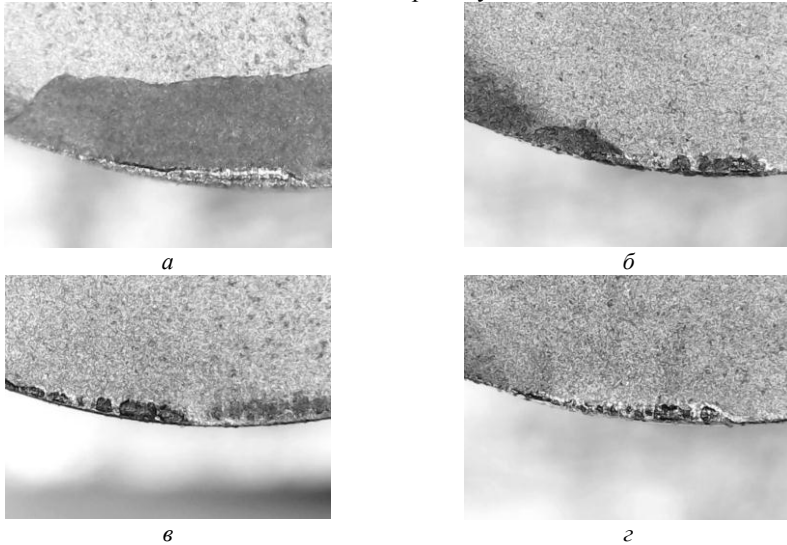


Рисунок 8 – Контактные участки инструментов со стороны передней поверхности.

Режущие пластины подготовлены под напыление по варианту:

а – 1 ($\tau = 3$ мин); б – 3 ($\tau = 3$ мин); в – 2 ($\tau = 3$ мин); г – 4 ($\tau = 3$ мин)

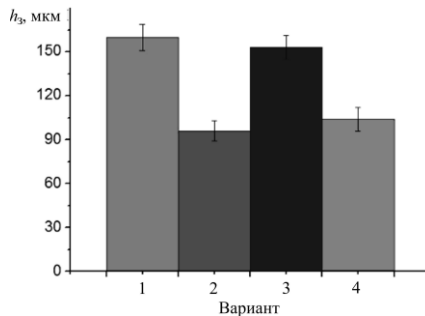


Рисунок 9 – Величина фаски износа инструментов после 9 минут резания.

1–4 – варианты подготовки режущих пластин под напыление (см. табл. 1)

Пластина, подготовка которой выполнялась по варианту 4, подвергалась очистке ионами Ag при температуре $\sim 520^\circ\text{C}$. Ag, имея большую массу чем N, приводит к более интенсивному разогреву и распылению обрабатываемого поверхностного слоя, что позволяет создать хорошую адгезию между покрытием TiAlSiYN/CrN и пластиной PcBN.

Выводы

Результаты проведенных исследований показывают, что высокая адгезия нанослойного покрытия TiAlSiYN/CrN с режущей пластиной из PcBN обеспечивается при очистке пластины в газовой плазме (N или Ar) и температуре нагрева $\sim 500^\circ\text{C}$.

При оценке адгезионной прочности покрытий высокой твердости при прогрессивном сканировании критическое значение нагрузки может быть определено в результате анализа акустического сигнала. Определение величины адгезионной прочности по координате начала зоны хрупкого разрушения покрытия на микрофотографии не целесообразно, поскольку сама зона разрушения распространяется в направлении, обратном перемещению индентора, по уже нагруженному участку царапины.

При условии, что очистка в газовой фазе не проводилась и/или поверхность режущей пластины при подготовке под напыление не прогревается до температуры 450°C , применение наиболее распространенного способа интенсификации адгезии – нанесения подслоя металла (Cr), не позволяет обеспечить прочное сцепление покрытия с пластиной из PcBN. При скрэтч-тестах максимальную величину силы скалывания демонстрировало покрытие, нанесенное на пластину, подготовленную по варианту 2 без подслоя металла.

При резании закаленной стали нанослойное защитное покрытие (TiAlSiY)N/CrN, при условии отсутствия его деляминации, существенно (в 1,6 раза) снижает износ режущего инструмента по задней поверхности. Поэтому, при подготовке режущих пластин под напыление наиболее перспективными являются очистка в вакууме в газовой плазме Ag с последующим нанесением подслоя Cr толщиной 50 нм, а многослойное покрытие TiAlSiYN/CrN позволяет повысить ресурс работы инструмента, оснащенного PcBN, при тяжелых условиях резания в 1,6 раза.

Список использованных источников: 1. *Манохин А. С.* Эффективность нанесения нитридных покрытий на инструменты из PCBN по данным зарубежных источников / А. С. Манохин // Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте: Мат. междунаrod. науч.-техн. семинара, 22–26 февраля 2016, г. Свалява, Карпаты. – К.: АТМ Украины, 2016. – С. 168–170.; 2. *Sveena S.* Scratch adhesion characteristics of PVD TiAlN deposited on high speed steel, cemented carbide and PCBN substrates / S. Sveena, J. M. Andersson, R. M'Saoubi, M. Olsson // Wear. – 2013. – 308. – P. 133–141; 3. *Верещака А. С.* Наноразмерные многослойно-композиционные покрытия для повышения износостойкости и работоспособности твердосплавных концевых фрез / А. С. Верещака, А. А. Верещака, Ю. И. Бубликов, М. Г. Оганян // Резание и инструменты в технологических системах. – 2014. – Вып. 84. – С. 26–42; 4. *Uhlmann E.* Investigation of wear resistance of coated PcBN turning tools for hard machining /

E. Uhlmann, H. Riemer, D. Schrüter et al. // Inter. J. of Refract. Met. and Hard Mat. – 2018. – Vol. 72. – P. 270–275. 5. Береснев В.М. Принципы создания плазменных многокомпонентных многофункциональных покрытий с высокими эксплуатационными свойствами : дис. докт. техн. наук / В. М. Береснев; Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, 2006. 6. Hovsepian P. E. Performance of HIPIMS deposited CrN/NbN nanostructured coatings exposed to 650 °C in pure steam environment / P.E. Hovsepian et al. // Mat. Chem. and Phys. – 2016; 7. Руденко В.П. Система управления нанесением сверхтвердых нанослойных вакуумно-дуговых покрытий. / В.П. Руденко, В.А. Столбовой, И.В. Сердюк, К.Г. Картазов // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2010. – Т. 6/1(48). – С. 66–69; 8. Игнатович С.Р. Универсальный микро/нано- индентометр «Микрон-гамма» / С.Р. Игнатович, И.М. Закиев // Заводская лаборатория. – 2011. – Т. 77, № 1. – С. 61–67; 9. Игнатович С.Р. Прибор для испытания материалов на микроабразивный износ / С.Р. Игнатович, И.М. Закиев, Е.П. Пугачевская // Проблемы тертя та зношування : зб. наук. праць – К.: НАУ, 2008. – Вип. 50. – С. 50–57; 10. Закиев И.М. Применение бесконтактного 3D профилометра «micron-beta» для точного определения износа / И.М. Закиев // Проблемы тертя та зношування: зб. наук. праць. – К.: НАУ, 2010. – Вип. 52 – С. 192–198.

Bibliography (transliterated): 1. Manokhin A. S. Effektivnost' nanoseniya nitridnykh pokrytiy na instrumenty iz PCBN po dannym zarubezhnykh istochnikov / A. S. Manokhin // Sovremennyye problemy proizvodstva i remonta v promyshlennosti i na transporte: Mat. mezhdunarod. nauch.-tekhn. seminara, 22–26 fevralya 2016, g. Svalyava, Karpaty. – K.: ATM Ukraine, 2016. – S. 168–170.; 2. Sveena S. Scratch adhesion characteristics of PVD TiAlN deposited on high speed steel, cemented carbide and PCBN substrates / S. Sveena, J. M. Andersson, R. M'Saoubi, M. Olsson // Wear. – 2013. – 308. – R. 133–141; 3. Vereshchaka A. S. Nanorazmernyye mnogoslono-kompozitsionnyye pokrytiya dlya povysheniya iznosostoykosti i rabotosposobnosti tverdosplavnykh kontsevykh frez / A. S. Vereshchaka, A. A. Vereshchaka, YU. I. Bublikov, M. G. Oganyan // Rezaniye i instrumenty v tekhnologicheskikh sistemakh. – 2014. – Vyp. 84. – S. 26–42; 4. Uhlmann E. Investigation of wear resistance of coated PcBN turning tools for hard machining / E. Uhlmann, H. Riemer, D. Schrtster et al. // Inter. J. of Refract. Met. and Hard Mat. – 2018. – Vol. 72. – P. 270–275. 5. Beresnev V. M. Printsipy sozdaniya plazmennyykh mnogokomponentnykh mnogofunktsional'nykh pokrytiy s vysokimi ekspluatatsionnymi svoystvami : dis. dokt. tekhn. nauk / V. M. Beresnev; Khar'kovskiy natsional'nyy universitet im. V. N. Karazina, 2006. 6. Hovsepian P. E. Performance of HIPIMS deposited CrN/NbN nanostructured coatings exposed to 650 °C in pure steam environment / P. E. Hovsepian et al. // Mat. Chem. and Phys. – 2016; 7. Rudenko V. P. Sistema upravleniya nanoseniyem sverkhkhtverdykh nanoslonoynykh vakuumno-dugovykh pokrytiy. / V. P. Rudenko, V. A. Stolbovoy, I. V. Serdyuk, K. G. Kartmazov // Vostochno-yevropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy. – 2010. – Т. 6/1(48). – С. 66–69; 8. Ignatovich S. R. Universal'nyy mikro/nano- indenter «Mikron-gamma» / S. R. Ignatovich, I. M. Zakiyev // Zavodskaya laboratoriya. – 2011. – Т. 77, № 1. – С. 61–67; 9. Ignatovich S. R. Pribor dlya ispytaniya materialov na mikroabrazivnyy iznos / S. R. Ignatovich, I. M. Zakiyev, Ye. P. Pugachevskaya // Problemi tertya ta znoshuvannya : zb. nauk. prats' – K.: NAU, 2008. – Vyp. 50. – С. 50–57; 10. Zakiyev I. M. Primeneniye beskontaktnogo 3D profilometra «micron-beta» dlya tochnogo opredeleniya iznosa / I. M. Zakiyev // Problemi tertya ta znoshuvannya: zb. nauk. prats'. – K.: NAU, 2010. – Vyp. 52 – S. 192–198.

Надійшла до редколегії 25.06.2018

УДК 621.623

Ф. В. Новиков, д-р техн. наук, Ю. Г. Гуцаленко,
И. А. Рябенков, канд. техн. наук, Харьков, Украина

ПРОГРЕССИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОЙ И ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ РЕЗАНИЕМ

В роботі наведено теоретичні рішення щодо визначення умов підвищення продуктивності, параметрів якості та точності механічної обробки лезовими та абразивними інструментами. Показано ефективність застосування силового та високошвидкісного різання, обґрунтовано умови зменшення енергоємності обробки, яка при лезовій обробці менше, ніж при шліфуванні. Доведено перспективність підвищення точності обробки за рахунок застосування шліфування без поперечної подачі з заданим початковим натягом в технологічній системі.

Ключові слова: механічна обробка, шліфування, продуктивність обробки, умовне напруження різання, температура різання, технологічна система, пружне переміщення

В работе приведены теоретические решения по определению условий повышения производительности, параметров качества и точности механической обработки лезвийными и абразивными инструментами. Показана эффективность применения силового и высокоскоростного резания, обоснованы условия уменьшения энергоёмкости обработки, которая при лезвийной обработке меньше, чем при шлифовании. Доказана перспективность повышения точности обработки за счет применения шлифования без поперечной подачи с заданным начальным натягом в технологической системе.

Ключевые слова: механическая обработка, шлифование, производительность обработки, условное напряжение резания, температура резания, технологическая система, упругое перемещение

The paper presents theoretical solutions for determining the conditions for increasing productivity, quality parameters and the accuracy of machining with blade and abrasive tools. The efficiency of the use of high-speed and high-speed cutting is shown, the conditions for reducing the energy intensity of the treatment, which are less than the grinding treatment, are justified. The prospects of increasing the accuracy of processing due to the use of grinding without transverse feed with a given initial tension in the technological system are proved.

Keywords: machining, grinding, processing capacity, conditional cutting stress, cutting temperature, technological system, elastic displacement

1. Постановка проблемы. Обработка металлов резанием благодаря низкой энергоёмкости процесса и высоким показателям качества, точности и производительности широко используется на практике. В настоящее время на смену устаревшему оборудованию и режущим инструментам приходят новые более совершенные высокооборотные металлорежущие станки с ЧПУ типа «обрабатывающий центр» и сборные твердосплавные и керамические лезвийные инструменты с износостойкими покрытиями. Это открывает новые технологические возможности повышения параметров качества, точности и производительности обработки, особенно материалов с повышенными физико-механическими свойствами. Однако для эффективного

осуществления процесса резания в каждом конкретном случае необходимо использовать оптимальные условия обработки, обеспечивающие снижение силовой и тепловой напряженности процесса. Это требует создания теоретических основ механической обработки, позволяющих аналитически решать оптимизационные задачи по обоснованию наиболее перспективных методов и условий обработки без привлечения традиционно применяемых эмпирических подходов, требующих выполнения трудоемких и продолжительных экспериментальных исследований.

2. Анализ последних исследований и публикаций. В настоящее время вопросам теоретического определения и оптимизации параметров механической обработки уделяется большое внимание в связи с высокими требованиями к показателям качества, точности и производительности обработки [1–3]. В одинаковой мере это относится к лезвийной и абразивной обработкам. Поэтому важно с единых позиций производить оценку технологических возможностей различных методов обработки и на этой основе определять оптимальные режимы резания, обеспечивающие наибольшую производительность и требуемые параметры качества и точности обработки. Значительные успехи в этом направлении достигнуты профессором Якимовым А. В. и его научной технологической школой [4–6]. Разработанные им теоретические (физико-математические) основы механической обработки и технологии машиностроения позволяют проектировать высокопроизводительные и высококачественные процессы обработки деталей резанием, а разработанный им процесс прерывистого шлифования является наиболее эффективным с точки зрения уменьшения температуры резания и энергоемкости обработки материалов повышенной твердости. Поэтому настоящая работа посвящена дальнейшему развитию научного направления профессора Якимова А. В. и направлена на повышение показателей качества, точности и производительности обработки.

3. Цель исследования. Аналитическое определение наиболее эффективных направлений развития методов обработки металлов резанием, обеспечивающих наибольшую производительность и требуемые параметры качества и точности обработки.

4. Теоретический анализ основных параметров лезвийной обработки и процесса шлифования. Для определения производительности обработки следует воспользоваться аналитической зависимостью, справедливой как для лезвийной обработки, так и для процесса шлифования [7]:

$$Q = S \cdot V = \frac{P_z}{\sigma} \cdot V, \quad (1)$$

где S – площадь поперечного сечения среза, м²; V – скорость резания, м/с; P_z – тангенциальная составляющая силы резания, Н; σ – условное напряжение резания, Н/м².

Как видно, увеличить производительность обработки Q можно увеличением параметров S и V или увеличением P_z , V и уменьшением σ . Увеличение тангенциальной составляющей силы резания P_z – это осуществление силового резания, а увеличение скорости резания V – осуществление скоростного (высокоскоростного и сверхвысокоскоростного) резания. Уменьшение условного напряжения резания σ (или энергоёмкости обработки) – это осуществление управления процессом стружкообразования при резании и в первую очередь контактными процессами, происходящими на рабочих поверхностях инструмента. Условное напряжение резания σ (или энергоёмкость обработки) описывается аналитической зависимостью:

$$\sigma = 2 \cdot \sigma_{\text{сжс}} \cdot \text{tg}(\psi - \gamma), \quad (2)$$

где $\sigma_{\text{сжс}}$ – предел прочности на сжатие обрабатываемого материала, Н/м²; ψ – условный угол трения на передней поверхности инструмента ($\text{tg}\psi = f$ – коэффициент трения); γ – передний угол инструмента.

Исходя из зависимости (2), уменьшить условное напряжение резания σ можно уменьшением угла $\psi - \gamma$, т.е. уменьшением условного угла трения ψ (коэффициента трения f) и увеличением переднего угла режущего инструмента γ . При определенных условиях $\psi - \gamma \rightarrow 0$, что позволяет существенно уменьшить условное напряжение резания σ и увеличить площадь поперечного сечения среза S и производительности обработки Q . Однако увеличение S при резании лезвийными инструментами ограничено прочностью его режущей части. Поэтому эффективно увеличивать производительность обработки Q путем увеличения скорости резания V , согласно зависимости (1).

Как известно, с увеличением скорости резания V уменьшается коэффициент трения f на передней поверхности инструмента, что способствует уменьшению условного напряжения резания σ и увеличению производительности обработки Q . Средняя температура образующейся стружки θ определяется приближенной зависимостью:

$$\theta = \frac{\sigma}{c \cdot \rho \cdot \left(1 + \frac{h}{a}\right)}, \quad (3)$$

где c – удельная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/кг·К; ρ – плотность обрабатываемого материала, кг/м³; a – толщина среза, м; h – толщина нагретого слоя обрабатываемой поверхности, м;

$$\frac{h}{a} = \sqrt{\frac{\lambda}{c \cdot \rho \cdot a \cdot V \cdot \text{tg}\beta}}, \quad (4)$$

λ – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, Вт/м·К; β – условный угол сдвига обрабатываемого материала.

С увеличением скорости резания V условный угол сдвига обрабатываемого материала β увеличивается, а отношение h/a уменьшается. Следовательно, уменьшается количество тепла, уходящего в обрабатываемую деталь, и увеличивается количество тепла, уходящего в образующуюся стружку. Средняя температура стружки θ (равная приблизительно температуре поверхностного слоя обрабатываемой детали) с увеличением скорости резания V увеличивается, асимптотически приближаясь к значению $\sigma/c \cdot \rho$ (рис. 1), т.к. согласно зависимости (3) множитель $(1+h/a) \rightarrow 1$. В этом состоит суть физического эффекта высокоскоростного и сверхвысокоскоростного резания, осуществляемого со скоростями резания свыше 100 м/с, поскольку в этом случае температура поверхностного слоя обрабатываемой детали остается фактически постоянной с увеличением скорости резания V .

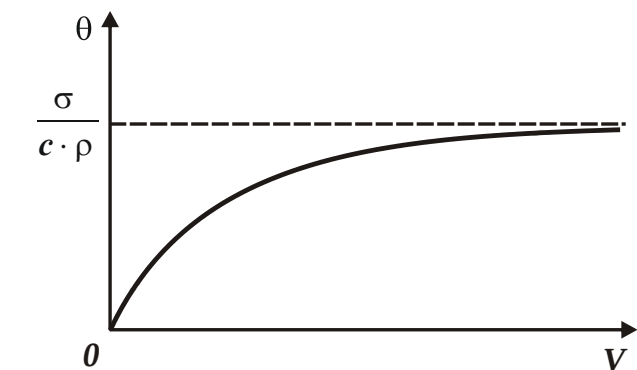


Рисунок 1 – Зависимость температуры поверхностного слоя обрабатываемой детали θ от скорости резания V

Необходимо отметить, что традиционные методы обработки лезвийными инструментами реализуют скорости резания, как правило, не более 2 м/с. Как показывает опыт ведущих иностранных станкостроительных фирм, переход в область высокоскоростного резания позволяет более чем в 10 раз увеличить производительность обработки при одновременном повышении качества и точности обрабатываемых поверхностей, что является кардинальным решением проблемы механической обработки материалов. Для практической реализации этих процессов обработки необходимо создание отечественных станков, работающих со скоростями резания порядка 10 000 м/мин. Это станет важным шагом подъема производства, повышения

конкурентоспособности машиностроительной продукции и увеличения производительности труда.

Вывявленные закономерности справедливы при резании металлических материалов. При резании неметаллических материалов практически все тепло уходит на нагревание режущего инструмента. В этом случае увеличение скорости резания ограничено и определяется уровнем силовой напряженности процесса и условиями теплоотвода из зоны резания, т.е. теплопроводностью инструментального материала.

При шлифовании материалов, в связи с отрицательными передними углами режущих зерен круга, зависимость (2) принимает вид:

$$\sigma = 2 \cdot \sigma_{сж} \cdot \operatorname{tg}(\psi + \gamma). \quad (5)$$

При условии $(\psi + \gamma) \rightarrow 90^\circ$ справедливо условие $\operatorname{tg}(\psi + \gamma) \rightarrow \infty$ (рис. 2). Следовательно, для уменьшения условного напряжения резания σ необходимо уменьшить углы ψ и γ , применяя эффективные технологические среды (снижающие коэффициент трения), а также обеспечивая высокую остроту режущих зерен и т.д. Сравнивая зависимости (2) и (5), видно, что при лезвийной обработке условное напряжение резания σ меньше, чем при шлифовании. При шлифовании меньше суммарная мгновенная площадь поперечного сечения среза всеми одновременно работающими зернами $S = Q/V_{кр}$ и, соответственно, производительность обработки Q (где $V_{кр}$ – скорость круга, м/с). Поэтому увеличить производительность Q можно увеличением скорости круга $V_{кр}$.

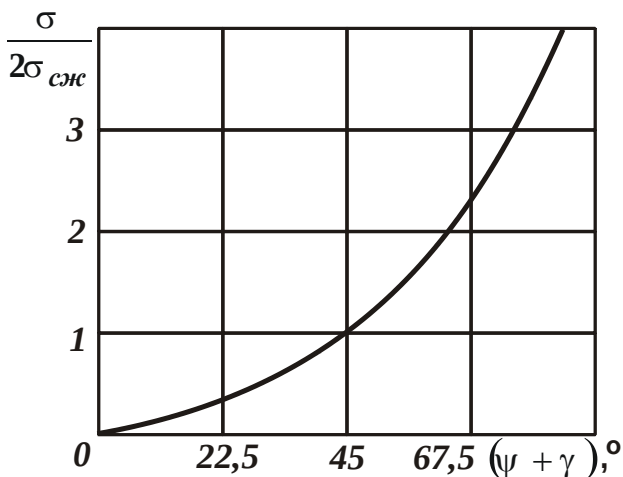


Рисунок 2 – Зависимость отношения $\sigma / 2\sigma_{сж}$ от угла $(\psi + \gamma)$

В общем виде при шлифовании материалов производительность обработки Q определяется зависимостью:

$$Q = \frac{P_y \cdot V_{кр} \cdot K_{ш}^2}{2 \cdot \sigma_{сж}}, \quad (6)$$

где P_y – радиальная составляющая силы резания, Н; $K_{ш} = P_z / P_y$ – коэффициент шлифования.

Исходя из зависимости (6), увеличить производительность обработки Q можно, прежде всего, увеличением коэффициента шлифования $K_{ш}$ за счет повышения режущей способности круга ($K_{ш}$ изменяется в пределах $f \dots 1$, где f – коэффициент трения зерен круга с обрабатываемым материалом). Параметры P_y и $V_{кр}$ оказывают одинаковое влияние на производительность обработки Q , т.е. эффективно применение как силового (глубинного), так и высокоскоростного (сверхвысокоскоростного) шлифования. Эффект усиливается в случае совмещения глубинного и высокоскоростного шлифования. Необходимо отметить, что в настоящее время ведущими иностранными станкостроительными фирмами освоено производство шлифовальных станков, работающих со скоростями резания на уровне 300 м/с.

Процессы механической обработки чрезвычайно сложны и мало изучены. К сожалению, и в настоящее время отсутствует четкое научное представление о механике поведения технологической системы при обработке. Это ограничивает возможности проектирования новых станков и создания высокоэффективных методов обработки. Для выработки новых решений необходимо перейти от традиционных эмпирических к научным аналитическим подходам, используя огромные достижения науки в области механики деформируемых систем. Например, рассчитывая упругое перемещение y и производительность обработки Q при круглом наружном шлифовании, получено интересное решение:

$$Q = Q_{ном} - (Q_{ном} - Q_0) \cdot e^{(-\bar{\beta} \cdot \tau)}; \quad (7)$$

$$y = y_{уст} - (y_{уст} - y_0) \cdot e^{(-\bar{\beta} \cdot \tau)}, \quad (8)$$

где $Q_{ном}$ – номинальная производительность обработки, м³/с;

$Q_0 = \frac{y_0 \cdot V_{кр} \cdot K_{ш} \cdot c}{\sigma}$ – производительность обработки при достижении

начального натяга в технологической системе y_0 , м³/с; c – жесткость

технологической системы, Н/м; $\bar{\beta} = \frac{V_{кр} \cdot K_{ш} \cdot c}{\pi \cdot D_{дет} \cdot l_{дет} \cdot \sigma}$; $y_{уст} = \frac{\sigma \cdot Q_{ном}}{V_{кр} \cdot K_{ш} \cdot c}$ –

установившаяся величина упругого перемещения в технологической системе, м; $D_{дет}$, $l_{дет}$ – диаметр и длина обрабатываемой детали, м; τ – время обработки, с.

Характер изменения Q и y с течением времени обработки показан на рис. 3а,б. При $Q_{ном} < Q_0$ и $y_{уст} < y_0$ выполняются условия $Q > Q_{ном}$ и $y > y_{уст}$ (кривая 1). При $Q_{ном} > Q_0$ и $y_{уст} > y_0$ выполняются условия $Q < Q_{ном}$ и $y < y_{уст}$ (кривая 3). При $Q_{ном} = Q_0$ и $y_{уст} = y_0$ выполняются условия $Q = Q_{ном}$ и $y = y_{уст}$ (кривая 2).

Средняя производительность обработки за время τ_1 для трех кривых, представленных на рис. 3а, будет различна. Так, если через фиксированную точку с координатами Q , τ_1 провести семейство кривых $Q-\tau$, то наибольшая средняя производительность обработки будет иметь место при условии $y_{уст} < y_0$, а наименьшая – при условии $y_0 = 0$ (рис. 3б). Очевидно, чем больше начальный натяг в технологической системе y_0 , тем больше средняя производительность обработки.

Из преобразованной зависимости (8): $y = y_{уст} \cdot [1 - e^{(-\beta \cdot \tau)}] + y_0 \cdot e^{(-\beta \cdot \tau)}$ следует, что наибольшее значение y_0 (для заданных значений y и $\tau = \tau_1$) достигается при условии $y_{уст} = 0$. Следовательно, наиболее производительной схемой обработки с учетом ограничения по точности обработки (определяемой величиной упругого перемещения y) является схема шлифования без поперечной подачи ($Q_{ном} = 0$) с начальным натягом y_0 в технологической системе. Текущие значения Q и y в данном случае определяются зависимостями (рис. 3в,г):

$$Q = Q_0 \cdot e^{-\frac{V_{кр} \cdot K_{ш} \cdot c \cdot \tau}{\pi \cdot D_{дет} \cdot l_{дет} \cdot \sigma}}; \quad (9)$$

$$y = y_0 \cdot e^{-\frac{V_{кр} \cdot K_{ш} \cdot c \cdot \tau}{\pi \cdot D_{дет} \cdot l_{дет} \cdot \sigma}}. \quad (10)$$

Чем больше значения $V_{кр}$, $K_{ш}$, c и меньше y_0 , $D_{дет}$, $l_{дет}$, σ , тем быстрее достигается заданная точность обработки. Очевидно, наибольшее значение y_0 может быть равно величине снимаемого припуска Π . Для выполнения этого условия, исходя из зависимости (9), необходимо, чтобы максимально возможная производительность обработки Q , обусловленная режущими свойствами шлифовального круга, была равна или соизмерима со значением Q_0 при условии $\tau = 0$ [6].

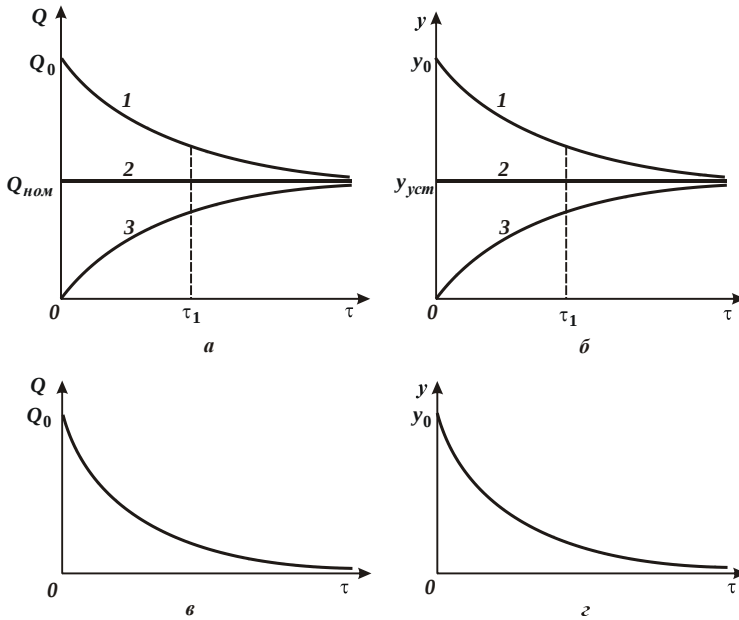


Рисунок 3 – Зависимости производительности обработки Q (а, в) и упругого перемещения y (б, г) от времени обработки τ

Зависимости (9) и (10) описывают "идеальную" схему резания с точки зрения обеспечения точности и производительности обработки, т.е. схему резания, которая в будущем может стать основной при механической обработке материалов. Из приведенных данных вытекает, что, создавая в технологической системе предварительный натяг y_0 , можно реализовать условие $Q > Q_{ном}$.

С учетом устойчивости процесса шлифования во времени эффективно также реализовать случай $Q = Q_{ном}$, т.е. условие $Q_{ном} = \frac{y_0 \cdot V_{кр} \cdot K_{ш} \cdot c}{\sigma}$.

Существуют два пути его осуществления:

1. Ускоренное врезание шлифовального круга в обрабатываемую деталь до создания требуемого натяга y_0 в технологической системе, а затем шлифование с номинальной производительностью обработки $Q = Q_{ном}$ (этап чернового шлифования). Для обеспечения требуемой точности обработки, равной величине y , необходимо уменьшить начальный натяг в технологической системе от значения y_0 до значения y . Это достигается введением этапа выхаживания (шлифования с отключенной поперечной

подачей, т.е. $Q_0 = 0$). В результате реализуется известный автоматизированный цикл круглого наружного шлифования (кривая 1, рис. 4 [8]), включающий этап ускоренного врезания шлифовального круга в обрабатываемую деталь (участок AB), затем этап чернового шлифования (участок BC) и этап выхода (участок CE). На рис. 4 показан также характер изменения упругого перемещения с течением времени обработки для неустановившегося процесса шлифования (кривая 2).

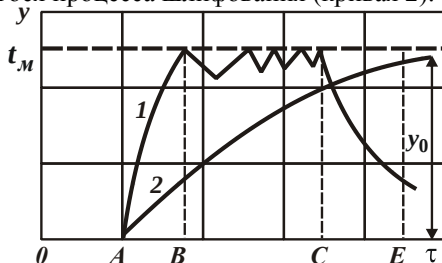


Рисунок 4 – Характер изменения упругого перемещения с течением времени обработки: 1 – автоматизированный цикл шлифования; 2 – неустановившийся процесс шлифования

На практике рассматриваемый автоматизированный цикл круглого наружного шлифования применяется при съеме относительно небольших припусков на доводочных операциях. В действительности его возможности значительно шире и он может быть использован при съеме больших припусков, которые, например, остаются после предварительной лезвийной и окончательной абразивной обработки. Эффект этого цикла шлифования состоит в обеспечении максимально возможной производительности для заданной точности обработки, а основным его ограничением является создание начального натяга в технологической системе, равного величине снимаемого припуска, который может достигать больших значений 1 ... 2 мм и более. В этих условиях на практике принято основную часть припуска удалять по жесткой схеме с заданной радиальной или продольной подачей инструмента и лишь небольшую часть припуска – по рассматриваемой схеме (с начальным радиальным перемещением y_0).

2. Шлифование по упругой схеме с фиксированным радиальным

усилием $P_{y_0} = c \cdot y_0 = \frac{Q_0 \cdot \sigma}{V_{кр} \cdot K_{ш}}$, которое позволяет стабилизировать во времени

процесс шлифования и обеспечить заданную производительность обработки.

Таким образом, кардинальным решением проблемы повышения производительности обработки при недостаточной жесткости технологической системы является применение автоматизированных циклов

шлифования по жесткой схеме с предварительным созданием натяга y_0 , а также применение упругой схемы шлифования с фиксированным радиальным усилием.

Выводы. В работе приведены аналитические зависимости для определения основных параметров механической обработки: производительности обработки, условного напряжения резания (энергоёмкости обработки), температуры резания, толщины нагретого слоя обрабатываемого материала при лезвийной обработке и шлифовании. На основе полученных аналитических зависимостей установлена эффективность применения силового и высокоскоростного резания с точки зрения снижения силовой и тепловой напряженностей процесса резания благодаря возможности уменьшения условного напряжения резания за счет снижения интенсивности трения в зоне обработки и повышения режущей способности инструмента. Теоретически показано, что при лезвийной обработке энергоёмкость обработки меньше, чем при шлифовании, а наиболее производительной схемой обработки с учетом ограничения по точности обработки, определяемой величиной упругого перемещения в технологической системе, является схема шлифования без поперечной подачи с заданным начальным натягом в технологической системе.

Список использованных источников: 1. Силин С. С. Метод подобию при резании материалов / С. С. Силин. – М.: Машиностроение, 1979. – 152 с. 2. Обработка резанием деталей с покрытиями / С. А. Клименко, В. В. Коломиец, М. Л. Хейфец и др.; под общей редакцией С. А. Клименко. – К.: ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2011. – 353 с. 3. Робочі процеси високіх технологій в машинобудуванні: навч. посібник / За редакцією А. І. Грабченко. – Харків: ХДПУ, 1999. – 436 с. 4. Якимов А. В. Оптимизация процесса шлифования / А. В. Якимов. – М.: Машиностроение, 1975. – 175 с. 5. Якимов А. В. Прерывистое шлифование / А. В. Якимов. – К.: Вища школа, 1986. – 175 с. 6. Теоретические основы резания и шлифования материалов: учеб. пособие / А. В. Якимов, Ф. В. Новиков, Г. В. Новиков и др. – Одесса: ОГПУ, 1999. – 450 с. 7. Новиков Ф. В. Современные экологически безопасные технологии производства: монография / Ф. В. Новиков, В. А. Жовтобрюх, Г. В. Новиков. – Д.: ЛИРА, 2017. – 372 с. 8. Лурье Г. Б. Прогрессивные методы круглого наружного шлифования / Г. Б. Лурье. – Изд. 2-е, перераб. доп. – Л.: Машиностроение, Ленинград. отд-ние, 1984. – 103 с.

Bibliography (transliterated): 1. Silin S. S. Metod podobiya pri rezanii materialov / S. S. Silin. – M.: Mashinostroyeniye, 1979. – 152 s. 2. Obrabotka rezaniyem detaley s pokrytiyami / S. A. Kli-menko, V. V. Kolomyets, M. L. Kheyfets i dr.; pod obshchey redaktsiyey S. A. Klivenko. – K.: ISM im. V. N. Bakulya NAN Ukrainy, 2011. – 353 s. 3. Robochi protsesi visokikh tekhnologiy v mashinobuduvanni: navch. posibnik / Za redaktsiyeu A. I. Grabchenko. – Kharkiv: KHDPU, 1999. – 436 s. 4. Yakimov A. V. Optimizatsiya protsessa shlifovaniya / A. V. Yakimov. – M.: Mashinostroyeniye, 1975. – 175 s. 5. Yakimov A. V. Preryvistoye shlifovaniye / A. V. Yakimov. – K.: Vishcha shkola, 1986. – 175 s. 6. Teoreticheskiye osnovy rezaniya i shlifovaniya materialov: ucheb. posobiye / A. V. Yakimov, F. V. Novikov, G. V. Novikov i dr. – Odessa: OGPU, 1999. – 450 s. 7. Novikov F. V. Sovremennyye ekologicheski bezopasnyye tekhnologii proizvodstva: monografiya / F. V. Novikov, V. A. Zhovtobryukh, G. V. Novikov. – D.: LIRA, 2017. – 372 s. 8. Lur'ye G. B. Progressivnyye metody naryzhnogo shlifovaniya / G. B. Lur'ye. – Izd. 2-ye, pererab. dop. – L.: Mashinostroyeniye, Leningrad. otd-niye, 1984. – 103 s.

Надійшла до редколегії 25.06.2018

УДК 621.923

В. И. Полянский, канд. техн. наук, Харьков, Украина

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛОВОГО ПРОЦЕССА ПРИ ШЛИФОВАНИИ МАТЕРИАЛОВ

Запропоновано нові спрощені аналітичні рішення щодо визначення температури шліфування та глибини проникнення тепла в поверхневий шар оброблюваної деталі, при досягненні якої температура дорівнює нулю. Ці рішення відкривають нові технологічні можливості пошуку оптимальних умов шліфування, що забезпечують підвищення якості та продуктивності обробки. Наведено приклади розрахунку оптимальних параметрів режиму шліфування за температурним критерієм.

Ключові слова: шліфування, тепловий процес, тепловий потік, температура шліфування, продуктивність обробки, режим шліфування, математична модель

Предложены новые упрощенные аналитические решения по определению температуры шлифования и глубины проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали, при достижении которой температура равна нулю. Эти решения открывают новые технологические возможности поиска оптимальных условий шлифования, обеспечивающих повышение качества и производительности обработки. Приведены примеры расчета оптимальных параметров режима шлифования по температурному критерию.

Ключевые слова: шлифование, тепловой процесс, тепловой поток, температура шлифования, производительность обработки, режим шлифования, математическая модель

New simplified analytical solutions are proposed for determining the temperature of grinding and the depth of penetration of heat into the surface layer of the workpiece, upon reaching which the temperature is zero. These solutions open up new technological opportunities for searching for optimal grinding conditions that improve the quality and productivity of processing. Examples are given of calculating the optimum parameters of the grinding mode according to the temperature criterion.

Keywords: grinding, thermal process, heat flow, grinding temperature, processing capacity, grinding mode, mathematical fashion

Постановка проблеми. Процес шліфування характеризується високою тепловою напруженістю, що приводить до виникненню на оброблюваних поверхностях деталей температурних дефектів. Як показує практика, основною причиною підвищення температури шліфування є висока енергоємність процесу в зв'язі з інтенсивним трінням в зоні різання і відносно низької режущої здатності круга. Тому ефективно застосовувати прогресивні методи прерывистого і алмазного шліфування, імпрегніровані і високопористі абразивні круги, забезпечуючі зменшення енергоємності обробки і температуру шліфування. Однак в повній мірі вирішити проблему їх зниження при шліфуванні не вдасться, що негативно сказується на якості оброблюваних поверхностей і вимагає зменшення продуктивності обробки, особливо при шліфуванні таких труднооброблюваних матеріалів як тверді сплави, зносостійкі

наплавки и покрытия, алмазы, ферриты и т.д. В связи с этим важно провести теоретический анализ параметров теплового процесса при шлифовании и определить условия уменьшения температуры шлифования.

2. Анализ последних исследований и публикаций. Проблеме снижения тепловой напряженности процесса шлифования и определения условий уменьшения температуры шлифования в научно-технической литературе уделено достаточно большое внимание [1–3]. На основе решения дифференциального уравнения теплопроводности раскрыты закономерности формирования температуры шлифования [3]. Однако полученные аналитические решения обладают существенным недостатком – в поверхностном слое обрабатываемой детали температура не достигает нулевого значения, она лишь асимптотически приближается к нему. Это не позволяет установить истинную глубину проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали, т.е. установить толщину нарушенного (или дефектного) слоя, образующегося от действия теплового источника. Поэтому настоящая работа направлена на устранение этого недостатка – аналитического определения условий уменьшения температуры шлифования с учетом достижения нулевого значения температуры в поверхностном слое обрабатываемой детали, что является новым направлением в теплофизике шлифования.

3. Цель исследования. Теоретическое обоснование условий повышения качества и производительности обработки при шлифовании на основе уменьшения температуры шлифования.

4. Анализ дифференциального уравнения теплопроводности и условия его упрощения. Профессор Якимов А. В. в работе [3] показал, что при шлифовании расчет температуры резания можно производить на основе упрощенной расчетной схемы, представляя снимаемый припуск пакетом элементарных прямолинейных адиабатических стержней, по которым уходит тепло из зоны резания вглубь поверхностного слоя обрабатываемой детали (рис. 1).

В итоге задача сводится к определению закона распределения температуры вдоль адиабатического стержня, на торце которого (в зоне контакта шлифовального круга с обрабатываемым материалом) действует тепловой источник с плотностью q в течении времени τ . Решить эту задачу можно, используя уравнение теплопроводности, которое было получено Фурье [4] путем выделения в рассматриваемом теле элементарного куба, грани которого параллельны координатным плоскостям (рис. 2). Суть расчета состоит в следующем. Количество тепла, проходящее через левую грань

справа налево за промежуток времени $\Delta\tau$, равно: $\lambda \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x}(x, y, z, \tau) \cdot \Delta y \cdot \Delta z \cdot \Delta \tau$,

где λ – коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м·град); θ –

температура тела в точке с координатами x, y, z , град.; $q = -\lambda \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x}(x, y, z, \tau)$
 – плотность теплового потока, Вт/м²; τ – время, с; $\Delta y \cdot \Delta z$ – площадь грани куба, м².

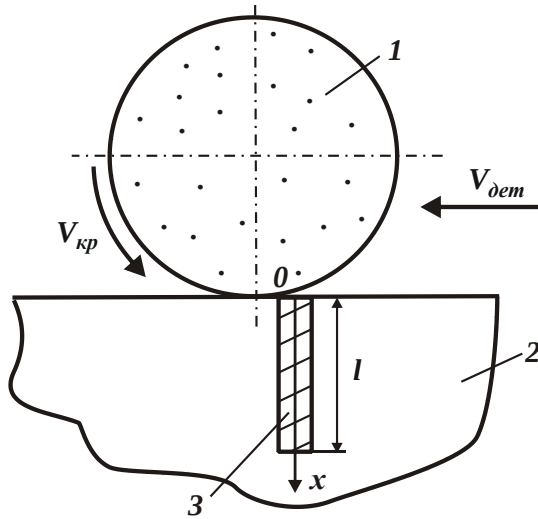


Рисунок 1 – Расчетная схема температуры шлифования:
 1 – круг; 2 – деталь; 3 – адиабатический стержень

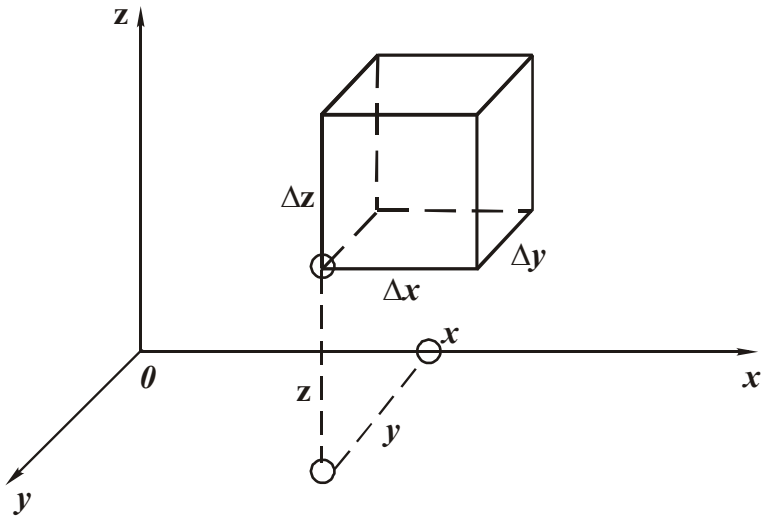


Рисунок 2 – Положение элементарного куба в координатных плоскостях

Количество тепла, проходящее через правую грань куба справа налево, равно: $\lambda \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x}(x + \Delta x, y, z, \tau) \cdot \Delta y \cdot \Delta z \cdot \Delta \tau$.

Количество тепла, вошедшее в куб через левую и правую грани:

$$\lambda \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x}(x + \Delta x, y, z, \tau) \cdot \Delta y \cdot \Delta z \cdot \Delta \tau - \lambda \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x}(x, y, z, \tau) \times \\ \times \Delta y \cdot \Delta z \cdot \Delta \tau \approx \lambda \cdot \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2}(x, y, z, \tau) \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z \cdot \Delta \tau. \quad (1)$$

Общее количество тепла, вошедшее в куб за время $\Delta \tau$ через все грани:

$$\lambda \cdot \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right) \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z \cdot \Delta \tau. \quad (2)$$

Количество тепла, необходимое для нагревания элементарного куба до температуры θ за время $\Delta \tau$, равно: $c \cdot \rho \cdot \frac{\partial \theta}{\partial \tau} \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z \cdot \Delta \tau$, где c – удельная теплоемкость материала, Дж/(кг·град); ρ – плотность материала, кг/м³.

Сравнивая эти величины, получено уравнение теплопроводности, представляющее собой линейное дифференциальное уравнение в частных производных второго порядка с учетом $a^2 = \lambda / (c \cdot \rho)$:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a^2 \cdot \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right). \quad (3)$$

Применительно к рассматриваемому случаю (в одномерной постановке) для упрощения расчетов можно в первом приближении не учитывать количество тепла, проходящее через левую грань справа налево за промежуток времени $\Delta \tau$. Тогда количество тепла, проходящее через правую грань куба справа налево, следует рассматривать в виде:

$\lambda \cdot \frac{d\theta}{dx}(x, y, z, \tau) \cdot \Delta y \cdot \Delta z \cdot \Delta \tau$, а количество тепла, затрачиваемое на нагревание адиабатического стержня, – соответственно в виде: $c \cdot \rho \cdot \Delta y \cdot \Delta z \cdot \int_0^x \theta \cdot dx$. Сравнивая эти величины, согласно закона сохранения

энергии, получено уравнение:

$$\lambda \cdot \frac{d\theta}{dx} \cdot \Delta t = c \cdot \rho \cdot \int_0^x \theta \cdot dx. \quad (4)$$

После дифференцирования обоих слагаемых по координате x , имеем:

$$\frac{d^2\theta}{dx^2} - \alpha \cdot \theta = 0, \quad (5)$$

$$\text{где } \alpha = \frac{c \cdot \rho}{\lambda \cdot \Delta \tau}.$$

В результате получено дифференциальное линейное уравнение второго порядка с постоянными коэффициентами без правой части. Оно соответствует уравнению (3) в одномерной постановке при условии $\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\theta}{\tau}$.

Его решение [4]:

$$\theta = C_1 \cdot e^{\sqrt{\alpha} \cdot x} + C_2 \cdot e^{-\sqrt{\alpha} \cdot x}, \quad (6)$$

где C_1, C_2 – постоянные интегрирования.

Для определения C_1 и C_2 необходимо использовать граничные условия:

$$\left. \frac{d\theta}{dx} \right|_{x=0} = -\frac{q}{\lambda}; \quad \theta|_{x \rightarrow \infty} = 0. \quad (7)$$

Подчиняя этим граничным условиям решение уравнения (6), имеем:

$$\theta = q \cdot \sqrt{\frac{\tau}{c \cdot \rho \cdot \lambda}} \cdot e^{-\sqrt{\frac{c \cdot \rho}{\lambda \cdot \tau}} \cdot x}. \quad (8)$$

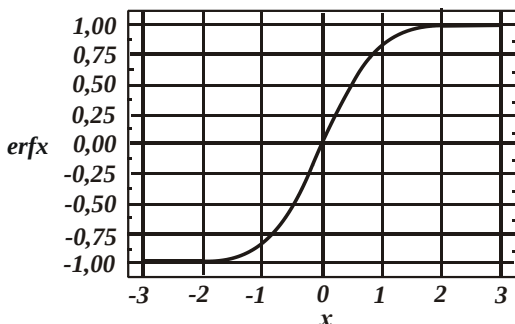
Как видно, по мере удаления от торца адиабатического стержня, т.е. от места действия теплового источника плотностью q , температура θ непрерывно уменьшается по экспоненциальному закону, асимптотически приближаясь к нулевому значению. Максимальная температура $\theta_{\max}$ определяется:

$$\theta_{\max} = q \cdot \sqrt{\frac{\tau}{c \cdot \rho \cdot \lambda}}. \quad (9)$$

В работе [5] приведено аналогичное решение уравнения теплопроводности (3) для одномерной системы координат (по координате x), которое решено методом интегрального преобразования и имеет вид:

$$\theta(x, \tau) = 2 \cdot a \cdot \sqrt{\frac{\tau}{\pi}} \cdot \frac{q}{\lambda} \cdot e^{-\frac{x^2}{4 \cdot a^2 \cdot \tau}} - \frac{q}{\lambda} \cdot x \cdot \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2 \cdot a \cdot \sqrt{\tau}} \right) \right], \quad (10)$$

где x – координата, м; τ – время, с; $\operatorname{erf} x = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_0^x e^{-t^2} \cdot dt$ – табулированная неэлементарная функция (рис. 3).

Рисунок 3 – Графік функції $\operatorname{erf} x$

Используя новую безразмерную координату: $z = x / (2a \cdot \sqrt{\tau})$, преобразованная зависимость (10) примет вид:

$$\theta(z, \tau) = 2 \cdot a \cdot \sqrt{\tau} \cdot \frac{q}{\lambda} \cdot \left[\frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot e^{-z^2} - z \cdot (1 - \operatorname{erf} z) \right]. \quad (11)$$

Зависимость (10) позволяет вполне однозначно определить максимальную температуру шлифования (температуру на торце адиабатического полубесконечного стержня – в точке его контакта с шлифовальным кругом):

$$\theta_{\max} = \theta(x = 0, \tau) = 2 \cdot a \cdot \sqrt{\frac{\tau}{\pi}} \cdot \frac{q}{\lambda} = 1,129 \cdot q \cdot \sqrt{\frac{\tau}{c \cdot \rho \cdot \lambda}}, \quad (12)$$

однако не позволяет определить истинное значение глубины z проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали. Его можно установить лишь с наперед заданной степенью точности, например, принимая $z = 1; 1,5; 2$ и т.д. Однако, по сути, это лишено физического смысла. Поэтому для определения истинного значения глубины z проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали необходимо использовать более приемлемый теоретический подход.

Сравнивая максимальные значения температуры $\theta_{\max}$, определяемые зависимостями (9) и (12), видно, что они отличаются лишь числовым коэффициентом (в 1,129 раз). Это указывает на то, что предложенный в настоящей работе упрощенный теоретический подход к определению температуры θ вполне правомочен, поскольку позволяет установить температуру θ по зависимости (9), которая незначительно отличается от температуры, полученной по зависимости (12), являющейся решением уравнения теплопроводности.

На рис. 4 и в табл. 1 приведены расчетные значения температуры θ (по координате z), полученные с использованием преобразованной зависимости

(11) и зависимости (8):

$$\theta = q \cdot \sqrt{\frac{\tau}{c \cdot \rho \cdot \lambda}} \cdot e^{-2z}. \quad (13)$$

Для удобства анализа принято $a \cdot \sqrt{\tau} \cdot q / \lambda = 1$. Расхождение расчетных значений температуры θ (по координате z) незначительно, что позволяет использовать зависимости (11) и (13) для практических расчетов температуры θ .

Таблица 1 – Расчетные значения функции $\theta(z)$

z	0	0,4	0,8	1,2	1,6	2,0
Зависимость (11)	1,129	0,5	0,182	0,051	0,016	0,0006
Зависимость (13)	1,0	0,449	0,202	0,09	0,048	0,018
Зависимость (16)	1,414	0,614	–	–	–	–

Основным недостатком полученного решения, также как и решения, описываемого зависимостями (10) и (11), является неопределенность глубины проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали, поскольку температура θ не достигает нулевого значения, она лишь асимптотически приближается к этому значению. Это не позволяет вполне однозначно определить толщину нарушенного или дефектного поверхностного слоя обрабатываемой детали в связи с тепловым воздействием на него в процессе шлифования.

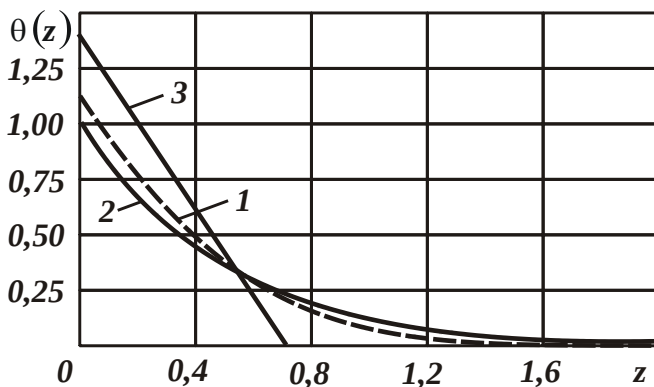


Рисунок 4 – Графики функции $\theta(z)$: 1 – расчет по зависимости (11);

2 – расчет по зависимости (13); 3 – расчет по зависимости (16)

5. Упрощенный расчет параметров теплового процесса при шлифовании. Решить данную задачу можно на основе упрощенного

представления расчетной схемы плоского шлифования, например, рассматривая в уравнении (4) величину $d\theta = \theta_n - \theta_k$, где θ_n , θ_k – начальное и конечное значения температуры, принимая для упрощения расчетов $\theta_k = 0$ и $\theta_n = \theta$.

Аналогично можно представить $dx = l_2$, где l_2 – глубина проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали, м. Тогда вместо интеграла в уравнении (4) следует рассматривать величину $0,5 \cdot c \cdot \rho \cdot l_2 \cdot \theta$, поскольку температура θ уменьшается по линейному закону от $\theta_n = \theta$ до $\theta_k = 0$ в пределах длины l_2 (рис. 5). В результате уравнение (4) примет упрощенный вид:

$$\frac{\theta}{l_2} = 0,5 \cdot \alpha \cdot l_2 \cdot \theta \quad \text{или} \quad l_2 = \sqrt{\frac{2}{\alpha}} = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda \cdot \tau}{c \cdot \rho}}. \quad (14)$$

Таким образом, упрощая полученное решение, удалось установить конечное значение величины l_2 . Максимальную температуру θ можно определить из упрощенной зависимости:

$$q = \lambda \cdot \frac{d\theta}{dx} = \lambda \cdot \frac{\theta_n - \theta_k}{l_2} \approx \lambda \cdot \frac{\theta}{l_2}. \quad (15)$$

Откуда

$$\theta = \frac{q \cdot l_2}{\lambda} = q \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \tau}{c \cdot \rho \cdot \lambda}}. \quad (16)$$

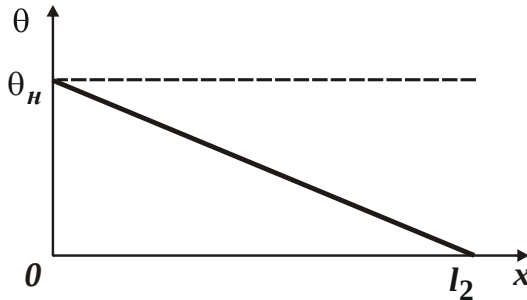


Рисунок 5 – График зависимости температуры θ от координаты x

Как видно, температура θ изменяется по закону изменения величины l_2 , т.е. чем больше l_2 , тем больше температура θ . Следовательно, уменьшить температуру θ можно уменьшением величины l_2 , фактически

исключая проникновение тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали.

В табл. 1 и на рис. 4 представлены расчетные значения температуры θ (по координате z) для начального значения $\theta_n = \theta$, определяемого зависимостью (16), и величиной l_2 , определяемой зависимостью (14), с учетом условия $a \cdot \sqrt{\tau} \cdot q / \lambda = 1$. Безразмерная координата $z = x / (2a \cdot \sqrt{\tau})$ для $x = l_2$ равна $z = 0,7071$. При этом значении z конечное значение температуры $\theta_k = 0$. Как видно из табл. 1 и рис. 4, максимальные значения температуры θ , рассчитанные на основе зависимостей (16) и (11) отличаются незначительно, что позволяет использовать упрощенное решение (16) для практических расчетов.

Необходимо отметить, что площади, ограниченные осями координат и функциями $\theta(z)$, одинаковы для трех рассмотренных случаев, поскольку одинаково количество тепла, образующееся в процессе шлифования за заданное время τ . Как видно, чем больше максимальное значение температуры θ , тем на меньшую глубину в поверхностный слой проникает тепло. Несомненно, наиболее точным решением является случай 3, согласно которому температура θ принимает нулевое значение на некотором удалении от теплового источника l_2 . Для первых двух случаев глубина проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали принимает бесконечное значение, что лишено физического смысла. Следовательно, для анализа параметров теплового процесса при шлифовании необходимо рассматривать случай 3 (рис. 4), который позволяет установить связь между температурой θ и величиной l_2 , представляя в таком виде замкнутую систему параметров теплового процесса при шлифовании. Рассматривая случаи 1 и 2 (рис. 4), можно установить лишь максимальную температуру θ , чего явно не достаточно для всестороннего анализа параметров теплового процесса при шлифовании и в целом – при резании материалов.

6. Определение оптимальных условий шлифования по температурному критерию. Рассмотрим возможности практического использования полученного упрощенного решения (16) для анализа теплового процесса при плоском шлифовании, принимая время контакта шлифовального круга с обрабатываемой деталью $\tau = l / V_{дет}$, где $l = \sqrt{2 \cdot t \cdot R_{кр}}$ – длина контакта шлифовального круга с обрабатываемой деталью, м; $V_{дет}$ – скорость детали, м/с; t – глубина шлифования, м; $R_{кр}$ – радиус шлифовального круга, м. Плотность теплового потока q выражается

зависимостью: $q = N / F$, где $N = P_z \cdot V_{кр}$ – мощность шлифования, Вт; $P_z = \sigma \cdot S_{мгн}$ – тангенциальная составляющая силы резания, Н; σ – условное напряжение резания, Н/м²; $S_{мгн} = Q / V_{кр}$ – мгновенная суммарная площадь поперечного сечения среза всеми одновременно работающими зернами круга, м²; $V_{кр}$ – скорость круга, м/с; $Q = B \cdot V_{дет} \cdot t$ – производительность обработки, м³/с; B – ширина шлифования, м; $F = B \cdot l$ – площадь контакта шлифовального круга с обрабатываемой деталью, м².

После соответствующих преобразований зависимость (16) примет вид:

$$\theta = \sigma \cdot t \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \frac{V_{дет}}{\sqrt{2 \cdot t \cdot R_{кр}}}} = \sigma \cdot \sqrt{\frac{Q_{уд}}{c \cdot \rho \cdot \lambda}} \sqrt{\frac{2 \cdot t}{R_{кр}}}, \quad (17)$$

где $Q_{уд}$ – удельная производительность обработки, м²/с.

Как следует из зависимости (17), уменьшить температуру θ можно уменьшением параметров σ , t и $V_{дет}$ или уменьшением глубины шлифования t при условии $Q_{уд} = const$, т.е. применяя многопроходное шлифование (с увеличенной скоростью детали $V_{дет}$).

Таким образом показано, что температура θ и величина l_2 взаимосвязаны между собой линейной зависимостью (16). Это позволяет совершенно по-новому анализировать тепловой процесс при шлифовании (или резании лезвийными инструментами) по сравнению с зависимостями (8) и (10), в которых температура θ не достигает конечного нулевого значения на некотором удалении от действия теплового источника, тогда как с физической точки зрения тепло не может мгновенно распространиться на бесконечное расстояние. Следовательно, полученное упрощенное решение, описываемое зависимостью (16), позволяет привести в соответствие теплофизические закономерности процесса шлифования и в целом закономерности процесса резания материала.

Выводы. В работе показано, что известные решения дифференциального уравнения теплопроводности применительно к процессу шлифования не позволяют определить глубину проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали, при достижении которой температура равна нулю, т.е., по сути, определить истинную толщину нарушенного (или дефектного) слоя обрабатываемого материала. В связи с этим в работе предложены новые упрощенные аналитические решения, которые позволили устранить этот недостаток и установить условия достижения температурой нулевого значения в поверхностном слое обрабатываемой детали. Полученные решения открывают новые технологические возможности поиска оптимальных условий шлифования, обеспечивающих повышение качества и производительности обработки. На

этой основе определена температура шлифования и обоснованы пути ее уменьшения без уменьшения производительности обработки, состоящие главным образом в применении многопроходного шлифования.

Список использованных источников: 1. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов / А.Н. Резников. – М.: Машиностроение, 1981. – 279 с. 2. Евсеев Д.Г. Формирование свойств поверхностных слоев при абразивной обработке / Д.Г. Евсеев. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1975. – 127 с. 3. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования / А.В. Якимов. – М.: Машиностроение, 1975. – 175 с. 4. Бугров Я.С. Высшая математика. Дифференциальные уравнения. Кратные интегралы. Ряды. Функции комплексного переменного / Я.С. Бугров, С.М. Никольский. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1981. – 448 с. 5. Чупров И. Ф. Уравнения математической физики с приложениями к задачам нефтедобычи и трубопроводного транспорта газа: учебное пособие / И. Ф. Чупров, Е. А. Канева, А. А. Мордвинов. – Ухта: УГТУ, 2004. – 128 с.

Bibliography (transliterated): 1. Reznikov A.N. Teplofizika protsessov mekhanicheskoy obrabotki materialov / A.N. Reznikov. – M.: Mashinostroenie, 1981. – 279 s. 2. Evseev D. G. Formirovanie svoystv poverkhnostnykh sloev pri abrazivnoy obrabotke / D. G. Evseev. – Saratov: Izd-vo Sarat. Un-ta, 1975. – 127 s. 3. Yakimov A.V. Optimizatsiya protsessa shlifovaniya / A.V. Yakimov. – M.: Mashinostroenie, 1975. – 175 s. 4. Bugrov Y. S. Vysshaya matematika. Differentsial'nyye uravneniya. Kratnyye integraly. Ryady. Funktsii kompleksnogo peremennogo / Y.S. Bugrov, S.M. Nikol'skiy. – M.: Nauka. Gl. red. fiz.-mat. lit., 1981. – 448 s. 5. Chuprov I. F. Uravneniya matematicheskoy fiziki s prilozheniyami k zadacham nefte dobychi i truboprovodnogo transporta gaza: uchebnoye posobiye / I. F. Chuprov, E. A. Kaneva, A. A. Mordvinov. – Ukhta: UGTU, 2004. – 128 s.

Надійшла до редколегії 25.06.2018

УДК 621.763

А.С. Сінковський, канд. техн. наук, М.Ф. Янюк, канд. техн. наук, О.В. Рибак,
Одеса, Україна

ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНІ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ НА ОСНОВІ ВІСКЕРІВ КАРБІДУ КРЕМНІЮ, ВИРОЩЕНИХ МЕТОДОМ ХІМІЧНИХ ТРАНСПОРТНИХ РЕАКЦІЙ

Експериментально розроблена продуктивна технологія вирощування віскерів карбиду кремнію, що дозволить використовувати вату з монокристалів SiC у якості теплоізоляційного та теплозахисного матеріалу. Визначені умови, необхідні для формування віскерів SiC за механізмом пара – рідина – кристал, та описана установка для їхнього отримання. Проведені дослідження структури та фізичних властивостей цих монокристалів. Також розглянуті можливості подальшого застосування таких матеріалів.

Ключові слова: теплозахисні матеріали, карбід кремнію, ниткоподібні монокристали, віскери, механізм пара – рідина – кристал.

Експериментально розроблена продуктивна технологія вирощування віскерів карбиду кремнію, яка дозволить використовувати вату з монокристалів SiC в якості теплоізоляційного та теплозахисного матеріалу. Определены условия, необходимые для формирования вискерів SiC по механизму пар – жидкость – кристалл, и описана установка для их получения. Проведены исследования структуры и физических свойств этих монокристаллов. Также рассмотрены возможности дальнейшего применения таких материалов.

Ключевые слова: теплозащитные материалы, карбид кремния, нитевидные монокристаллы, вискеры, механизм пар – жидкость – кристалл.

In this article a productive technology for silicon carbide whiskers growing is presented and experimentally carried out. That would allow to use SiC nanowire materials for thermal insulation and thermal protection. Conditions necessary for creating SiC whiskers on the vapor–liquid–solid method are determined, and the equipment for their obtaining is considered. The structure and physical properties of these nanowires are studied. The possibilities for the further application of those materials are considered as well.

Key words: thermal insulation, silicon carbide, nanowires, whiskers, vapor–liquid–solid method.

Вступ. Впровадження енергозберігаючих технологій є актуальною задачею сучасної світової економіки, промисловості і науки. Теплозахисні матеріали дозволяють не лише підвищувати ефективність промислового виробництва та зменшувати споживання енергетичних ресурсів, але й використовуються в якості засобів захисту поверхонь та інших елементів конструкцій від нагрівання та впливу гарячих газових потоків. На сьогоднішній день на виробництві використовують багато різних високотемпературних теплозахисних матеріалів, які виготовляють переважно зі скла або з кам'яних порід. Вони можуть працювати при температурах близько 1000°C, маючи низький коефіцієнт теплопровідності в межах 0,035 – 0,039 Вт/(м·К) та невелику густину 0,03 – 0,22 г/см³. Виробництво кам'яної вати пов'язане зі складною технологією, яка включає плавлення матеріалу і витягування з нього ниток [1].

Сучасний рівень розвитку техніки дозволяє створювати теплозахисні та ізоляційні матеріали нового покоління – легкі, міцні й зносостійкі, вони можуть застосовуватись при більш високих температурах і в хімічно агресивних середовищах. Виключні властивості, що дозволяють задовольнити ці вимоги, притаманні віскерам – ниткоподібним кристалам, які можна отримати лише за певних умов кристалізації. Незважаючи на розвиток великої кількості методів і технологій вирощування віскерів різного складу та високої якості, більшість з них не виходить за межі лабораторних досліджень, і недостатньо ефективні для використання у промисловості.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Нинішній прогрес технологій створення віскерів є результатом багатьох експериментів з вирощування ниткоподібних монокристалів та дослідження їхніх властивостей, що тривають вже понад 60 років [2 – 8]. У 1955 році Дж.В. Сірс вперше пояснив формування віскерів ртуті і описав механізм аксіальної гвинтової дислокації [3]. 1970-го року вийшла монографія "Whisker Technology" [4], яка підсумовувала весь тогочасний досвід з теоретичних питань та відтворюваних експериментів одержання вусів. У цій книзі містився окремий розділ «Ріст кристалів за механізмом пара – рідина – кристал», написана Р.Вагнером, у якій автор висунув теоретичні та експериментальні обґрунтування на користь створеної ним нової моделі вирощування віскерів. Серед вчених, що зробили внесок у розвиток ПРК-механізму, слід відзначити роботи Є.І. Гіваргізова [5]. На початку 2000-х років спостерігався новий сплеск досліджень одновимірних монокристалів, пов'язаний з перспективами їхнього застосування в електроніці, біоінженерії та нанотехнологіях. Попри значне просування вперед у розумінні засад розглянутих процесів, зроблене, зокрема, у роботах групи Ч. Лібера з Гарвардського університету (США) [6,7] та Л. Самуельсона з університету Лунда (Швеція) [8], завершеної теорії зародження і росту віскерів на сьогоднішній момент не існує.

Мета даної роботи полягає в розробці простої, ефективної та економічно доступної технології вирощування віскерів карбиду кремнію, які б відзначались високою якістю і термостійкістю. Продуктивність запропонованого методу отримання високотемпературної вати є важливою умовою, що дозволить застосовувати його у промислових масштабах. Необхідно також проаналізувати характеристики створених віскерів і в якості окремих нанооб'єктів, і в якості фрагментів дискретного теплозахисного матеріалу.

Методика вирощування віскерів. Технологія отримання віскерів карбиду кремнію SiC базується на особливостях конструкції устаткування, що забезпечує своєчасний перебіг та сталий характер хімічних транспортних реакцій. На рис. 1 наведена схема установки для вирощування вусів з карбиду кремнію.

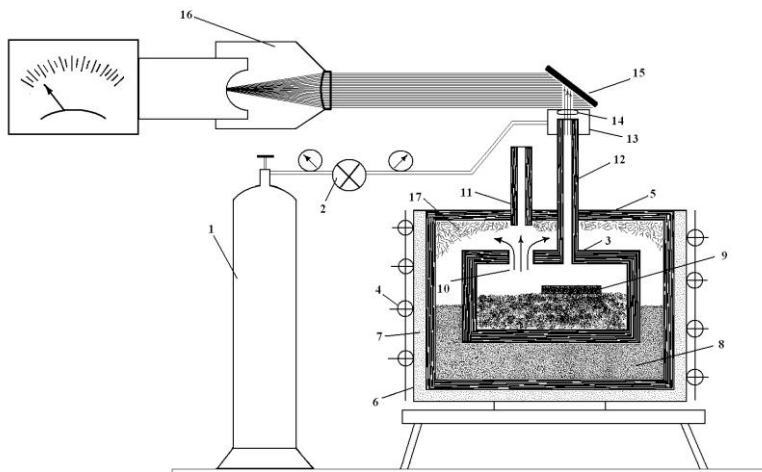
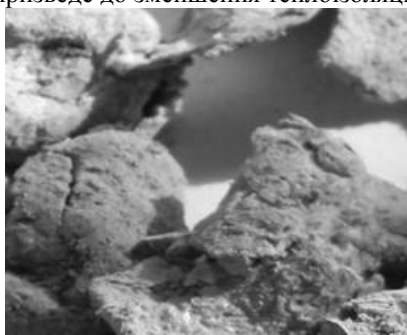


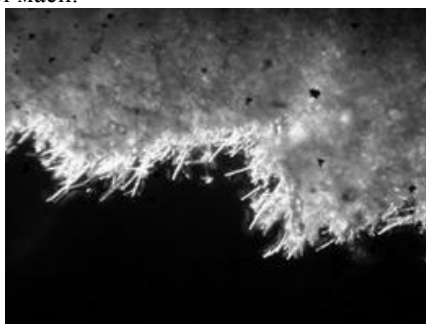
Рисунок 1 – Схема установки для отримання віскерів SiC: 1 – балон з аргонем; 2 – газовий редуктор; 3 – реакційна камера; 4 – індуктор СВЧ; 5 – графітовий контейнер, просякнутий кремнієм; 6 – лист азбестовий; 7 – термоізоляція з порошку α -BN; 8 – робоча порошкова суміш; 9 – пластина, покрита шаром SiC, поверх великорозмірного порошку карбіду кремнію, для контролю температури; 10 – отвір, що виводить пари карбіду кремнію; 11 – вивідна трубка; 12 – патрубок для направлення світлового потоку на дзеркало; 13 – тубус перехідний; 14 – тугоплавке кварцеве скло; 15 – дзеркало; 16 – фотоелектричний пірометр ФЕП-4М; 17 – вата з вусів SiC

У контейнер діаметром 300 мм, виготовлений з просякнутого кремнієм графіту, засипається робоча порошкова суміш, що складається з 40% Si, 40% SiC, 18% SiO_2 та 2% NaCl. Всередині його встановлюється інший графітовий контейнер, у якому міститься великорозмірний порошок карбіду кремнію. Нагрівання зовнішнього контейнера здійснюється за допомогою генератора СВЧ та індуктора діаметром 350 мм. Для теплоізоляції між індуктором і контейнером розміщується азбестовий лист товщиною 5 мм, а в проміжок між листами азбесту і контейнером засипається порошок α -BN. Перебіг процесу відбувається за температури біля 2000°C . Вимірювання температури всередині контейнера здійснюється фотоелектричним пірометром ФЕП-4М за допомогою дзеркала, що змінює напрямок ходу променів, які йдуть від розпечених ділянок всередині камери, де знаходиться порошкова суміш. Пари карбіду кремнію виводяться через спеціальний отвір у зовнішню камеру та вступають у взаємодію з матеріалами робочої суміші, що перебувають у газовій фазі. Піднімаючись вгору, вони осідають на більш холодній кришці контейнера та утворюють ниткоподібні монокристали карбіду кремнію.

На рис. 2а та 2б показані фрагменти вати з монокристалів карбіду кремнію, отриманої за описаною технологією. Середня довжина вирощених віскерів становить біля 300 мкм, товщина 1 – 2 мкм. Щільність утвореної вати – $0,15 \text{ г/см}^3$, а її теплопровідність біля $0,05 \text{ Вт/(м·К)}$. Теплоізоляційні властивості вата зберігає до високих температур, але використовувати її в промислових установках слід за температур не вищих, ніж 2000°C . При більш високих температурах різко зростає швидкість випаровування [9], що призведе до зменшення теплоізоляційної маси.



а



б

Рисунок 2 – Фрагменти вати, отриманої з монокристалів SiC: загальний вигляд (а) та збільшене зображення (б)

Розглянута технологія дозволяє одержувати досить значні об'єми вати з монокристалів карбіду кремнію. Так, при температурі 1950°C за дві години було одержано 2000 см^3 вати.

Аналіз результатів експерименту. Хімічний склад отриманих віскерів зумовлений, насамперед, точним вибором пропорцій компонентів робочої суміші. Хімічно чистий карбід кремнію містить 70,04% Si і 29,96% C. Його густина становить $3,1 - 3,2 \text{ г/см}^3$, температура плавлення 2830°C , мікротвердість 30 – 33 ГПа, твердість за шкалою Мооса понад 9,1 – 9,5. Хімічно чистий карбід кремнію не має кольору, на відміну від технічного карбіду кремнію, який може бути як чорним, так і зеленим. Спостереження показали, що колір промислового карбіду кремнію залежить від складу газової фази. За умови наявності в реакційному середовищі кисню утворюється зелений SiC, а при його відсутності – чорний [10].

Рентгеноструктурний аналіз виявив, що обидва карбіди утворюють дві структурні модифікації. Переважаючою є кубічна з параметром ґратки $a = 4,36\text{\AA}$ і, в значно меншій кількості, – гексагональна з параметрами ґратки $a = 3,0\text{\AA}$ та $c = 12,27\text{\AA}$. При цьому на рентгенограмі зеленого SiC виявлені слабкі лінії, що не належать до карбіду кремнію, а, скоріш за все, відносяться до оксидів шпінельного типу, які і спричиняють зелене забарвлення [11].

Зелений карбід кремнію за своїм хімічним складом та фізико-механічними властивостями дещо відрізняється від карбіду кремнію чорного. Зелений SiC має вищу твердість та меншу густину, ніж чорний. Його абразивна здатність перевершує чорний карбід кремнію на 10–15%. До того ж, зелений карбід кремнію характеризується значною тугоплавкістю, високою вогнетривкістю, винятковою твердістю, високою ріжучою здатністю. Виходячи з цих порівнянь, було вирішено вирощувати ниткоподібні кристали зеленого SiC.

Механізм зародження і росту ниткоподібних кристалів SiC залежить від великої кількості параметрів. На даний час не існує завершеної теорії росту напівпровідникових віскерів, яка б враховувала всі процеси, що впливають на утворення кристалів, а також взаємозв'язок між цими процесами. Формування ниткоподібних кристалів більшість авторів пояснюють за допомогою ПРК-механізму [12, 13], спираючись на утворення каплеподібних наростів – глобул на голкоподібних кристалах карбіду. Згідно ПРК-механізму, речовина, яка бере участь в утворенні віскерів, на першому етапі конденсується з пари на поверхню рідкого розчину, а коли він стає перенасиченим, речовина осаджується на поверхню кристалу, що спричиняє його подальший ріст [14]. Слід зазначити, що поряд з ПРК-механізмом існують інші теоретичні моделі процесів росту віскерів, і утворення глобул на вершині ниткоподібних кристалів відбувається не завжди. Однак технологія вирощування монокристалів карбіду кремнію, описана в даній роботі, відповідає умовам утворення віскерів за ПРК-механізмом.

Аналіз механізму росту віскерів невід'ємно пов'язаний з процесами, що відбуваються на поверхні підложки, у якості якої в нашому експерименті виступає більш холодна кришка контейнера. Вона виготовлена з графіту, просякнута кремнієм, а отже має пористу структуру. Ця властивість підложки має важливе значення [15], оскільки сприяє зародженню кластерів ниткоподібних кристалів SiC. Ще однією важливою умовою росту вусів за ПРК-механізмом є живлення рідкої фази внаслідок високого рівня пересичення парів карбіду кремнію [16]. Частинки речовини потрапляють в краплю на вершині голкоподібного кристалу безпосередньо з газової фази, у якій містяться компоненти робочої суміші і пари карбіду кремнію, і за рахунок пересичення парів SiC відбувається перенасичення рідкого розчину ζ у краплі, значення якого можна визначити за формулою:

$$\zeta = \frac{C}{C_{\text{pie}}(T)} - 1, \quad (1)$$

де C – поточна концентрація розчину, $C_{\text{pie}}(T)$ – рівноважна концентрація за температури росту T . Якщо вважати поточну концентрацію розчину сталою внаслідок підтримки високого рівня пересичення парів SiC та сталої температури процесу, розмір краплі буде постійним під час росту кристалу.

Швидкість росту віскерів за цієї умови визначатиметься розмірним ефектом Гіббса-Томсона, що пов'язує тиск насиченої пари над поверхнею віскера з радіусом його кривизни. Згідно рівнянню Гіббса-Томсона, тиск пересиченої пари p_r над поверхнею краплі з радіусом r співвідноситься з рівноважним тиском пари p_∞ над плоскою поверхнею конденсату за температури T :

$$\frac{p_r}{p_\infty} = \exp\left(\frac{2\sigma \cdot V_m}{r \cdot T \cdot R}\right), \quad (2)$$

де σ – поверхнева енергія на межі кристал-пара, V_m – молярний об'єм, R – універсальна газова стала. Отже, чим менший радіус краплі, тим більшим буде тиск перенасиченої пари над її поверхнею.

Підтвердженням того, що формування віскерів відбувається за ПРК-механізмом, слугує зображення структури утворених кристалів (рис. 3). З нього видно, що вата містить окремі монокристали SiC, а також глобули діаметром біля 10 мкм. Задля того, щоб певною мірою оцінити розміри монокристалів і глобул, на фото було нанесено мікроскопічну шкалу (рис. 4). Ціна поділок шкали становить 10^{-5} м, що не дає змоги точно визначити діаметр монокристалів, тим не менш, їхню довжину і розміри глобул можна виміряти, а отримані величини відповідають зазначеним вище характеристикам.

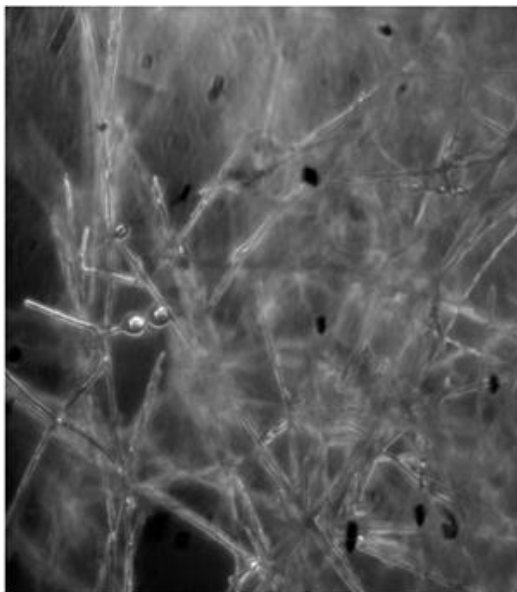


Рисунок 3 – Фотографія віскерів карбіду кремнію.

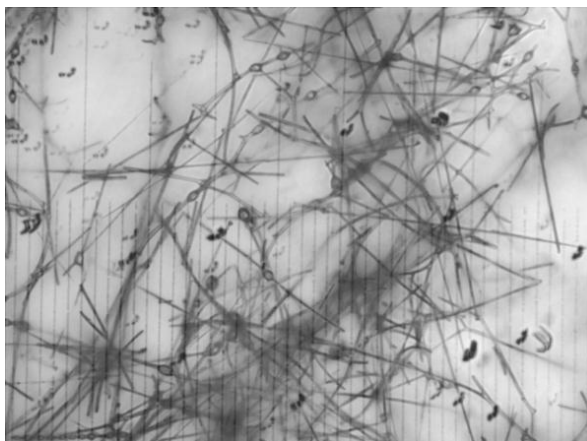


Рисунок 4 – Фотографія монокристалів SiC, зроблена на оптичному мікроскопі, з нанесеною шкалою.

Висновки. Розроблена технологія вирощування віскерів карбіду кремнію, основою якої слугують хімічні транспортні реакції, що дозволяють утворювати ниткоподібні монокристали SiC за ПРК-механізмом. Проведені експерименти свідчать про те, що дана технологія є досить продуктивною для промислового застосування. Були проаналізовані фізичні властивості отриманого матеріалу та особливості кристалічної будови окремих монокристалів. Також визначені умови, за яких вата з віскерів SiC може використовуватись в якості теплоізоляційного та теплозахисного матеріалу.

Перспективи подальшого розвитку. Одержані монокристали можуть бути використані не лише як теплоізолятор, але і в якості армованої складової при створенні композиційних матеріалів. Зокрема, створений на кафедрі Технології конструкційних матеріалів та матеріалознавства Одеського національного політехнічного університету спільно з Інститутом проблем матеріалознавства НАН України композиційний матеріал на основі волокон SiC, плакованих нікелем і спечених при температурі 1400°C під тиском, показав перспективність використання таких структур.

Список використаних джерел: 1. Синьковский А.С. Високотемпературная вата на основе монокристаллов карбида кремния / А.С. Синьковский, Н.Ф. Янюк, О.В. Рыбак // Today material engineering for realization of the «MMATENG» project objectives / Conference proceedings of the International Scientific and Methodological Conference «University Science – 2016». – Mariupol: TOB "ППНЦ", 2016. – с.129-131. 2. Wagner R. S. Vapor-Liquid-Solid Mechanism of Single Crystal Growth / R. S. Wagner, W. C. Ellis // Applied Physics Letters, Vol. 4. – 1964. – №5. – p. 89-90. 3. Sears G.W. A growth mechanism for mercury whiskers / G.W. Sears // Acta Metallurgica. – 1955. – №3. – p. 361-366. 4. Levitt A.P. Whisker technology / A.P. Levitt, W.B. Campbell, R.S. Wagner and oth. – New York: Wiley-Interscience, 1970. – 478 p. 5. Гиваргизов Е.И. Рост нитевидных и пластинчатых кристаллов из пара / Е.И. Гиваргизов. – М.: Наука, 1977. – 304 с. 6. Wei Q. Solution-based synthesis of magnesium oxide nanorods / Q. Wei, C.M. Lieber // Materials Research Society Symposium

Proceedings, Vol. 581. – 2000. – p. 3-7. 7. Lieber C.M. Functional Nanowires / C. M. Lieber, Z. L. Wang // MRS bulletin, Vol. 32. – Cambridge University Press, 2007. – №2 – p. 99-108. 8. Samuelson L. Epitaxial Quantum Wires: Growth, Properties and Applications / Lars Samuelson, B. Jonas Ohlsson [and oth.] // Nanowires and Nanobelts. – Springer US, 2003. – p. 69-92. 9. Котельников Р.Б. Особо тугоплавкие элементы и соединения. Справочник / Р.Б. Котельников, С.Н. Башлыков и др. – М.: Металлургия, 1968. – 376 с. 10. Вольф Р. Монокристалльные волокна и армированные ими материалы / Р. Вольф, Т. Василос. – М.: Мир, 1973. – 462 с. 11. Синьковский А.С. Исследование процессов образования жаростойких покрытий из дисилицида молибдена и карбида кремния на графите / А.С. Синьковский. – Одесса. Автореферат, 1971. – 20 с. 12. Францевич И.Н. Карбид кремния / И.Н. Францевич, Г.Г. Гнесин и др. – К: Наукова думка, 1975. – 84 с. 13. Исайкин А.С. Механизм пар – жидкость – твердая фаза в росте нитевидных кристаллов карбида кремния / А.С. Исайкин, В.Н. Грибков, Б.В. Шетанов и др. // Высокотемпературные карбиды. – К: Наукова думка, 1975. – с. 65-70. 14. Сыркин В.Г. Материалы будущего / В.Г. Сыркин. – М.: Наука, 1990. – 192 с. 15. Козлова О.Г. Рост и морфология кристаллов / О.Г. Козлова. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1980. – 368 с. 16. Дорфман В.Ф. Микрометаллургия в микроэлектронике / В.Ф. Дорфман. – М.: Металлургия, 1978. – 272 с.

Bibliography (transliterated): 1. Sinkovskij A.S. Vysokotemperaturnaya vata na osnove monokristallov karbida kremniya / A.S. Sinkovskij, N.F. Yanyuk, O.V. Rybak // Today material engineering for realization of the «MMATENG» project objectives / Conference proceedings of the International Scientific and Methodological Conference «University Science – 2016». – Mariupol: TOV "PPNS", 2016. – s.129-131. 2. Wagner R. S. Vapor-Liquid-Solid Mechanism of Single Crystal Growth / R. S. Wagner, W. C. Ellis // Applied Physics Letters, Vol. 4. – 1964. – №5. – p. 89-90. 3. Sears G.W. A growth mechanism for mercury whiskers / G.W. Sears // Acta Metallurgica. – 1955. – №3. – p. 361-366. 4. Levitt A.P. Whisker technology / A.P. Levitt, W.B. Campbell, R.S. Wagner and oth. – New York: Wiley-Interscience, 1970. – 478 p. 5. Givargizov E.I. Rost nitevidnyh i plastinchatyh kristallov iz para / E.I. Givargizov. – М.: Nauka, 1977. – 304 s. 6. Wei Q. Solution-based synthesis of magnesium oxide nanorods / Q. Wei, C.M. Lieber // Materials Research Society Symposium Proceedings, Vol. 581. – 2000. – p. 3-7. 7. Lieber C.M. Functional Nanowires / C. M. Lieber, Z. L. Wang // MRS bulletin, Vol. 32. – Cambridge University Press, 2007. – №2 – p. 99-108. 8. Samuelson L. Epitaxial Quantum Wires: Growth, Properties and Applications / Lars Samuelson, B. Jonas Ohlsson [and oth.] // Nanowires and Nanobelts. – Springer US, 2003. – p. 69-92. 9. Kotelnikov R.B. Osobo tugoplavkie elementy i soedineniya. Spravochnik / R.B. Kotelnikov, S.N. Bashlykov i dr. – М.: Metallurgiya, 1968. – 376 s. 10. Volf R. Monokristalnye volokna i armirovannye imi materialy / R. Volf, T. Vasilos. – М.: Мир, 1973. – 462 s. 11. Sinkovskij A.S. Issledovanie processov obrazovaniya zharostojkih pokrytij iz disilicida molibdena i karbida kremniya na grafite / A.S. Sinkovskij. – Odessa. Avtoreferat, 1971. – 20 s. 12. Francevich I.N. Karbid kremniya / I.N. Francevich, G.G. Gnesin i dr. – К: Naukova dumka, 1975. – 84 s. 13. Isajkin A.S. Mehanizm par – zhidkost – tverdaya faza v roste nitevidnyh kristallov karbida kremniya / A.S. Isajkin, V.N. Gribov, B.V. Shetanov i dr. // Vysokotemperaturnye karbidy. – К: Naukova dumka, 1975. – s. 65-70. 14. Syrkin V.G. Materialy budushhego / V.G. Syrkin. – М.: Nauka, 1990. – 192 s. 15. Kozlova O.G. Rost i morfologiya kristallov / O.G. Kozlova. – М.: Izd-vo Mosk. un-ta, 1980. – 368 s. 16. Dorfman V.F. Mikrometallurgiya v mikroelektronike / V.F. Dorfman. – М.: Metallurgiya, 1978. – 272 s.

Надійшла до редколегії 25.06.2018

УДК 621.833.65

В.М. Тигарев, канд. техн. наук, В.М. Тонконогий, д-р техн. наук,
А.А. Гончаренко, бакалавр Одесса, Україна

ОБЩИЙ ПОДХОД К ПРОЕКТИРОВАНИЮ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ КОНСТРУКЦИИ РАМЫ ЭЛЕКТРОСКУТЕРА И СИМУЛЯЦИИ НАГРУЗОК В САПР INVENTOR

Розглянуто загальний підхід к проектуванню та аналізу просторової каркасно-векторної параметричної моделі рами електричного скутера за допомогою САПР Autodesk Inventor Professional. Наведено методика та технологія комп'ютерного моделювання рами електричного скутера. Виконано аналіз для трьох конфігурацій моделі рами електричного скутера на базі методу скінченних елементів. Проведено оптимізація за елементами та матеріалами.

Ключові слова: параметрична модель, рама електричного скутера, комп'ютерне моделювання

Рассмотрен общий подход к проектированию и анализу нагрузок пространственной каркасно-векторной параметрической модели рамы электрического скутера с помощью САПР Autodesk Inventor Professional. Представлена методика и технология компьютерного моделирования рамы электрического скутера. Выполнен анализ для трех конфигураций модели рамы электрического скутера на базе метода конечных элементов. Проведена оптимизация по элементам конструкции и материалам.

Ключевые слова: параметрическая модель, рама электрического скутера, компьютерное моделирование

The general design approach and to the analysis of loadings of spatial frame and vectorial parametric model of frame of the electrical scooter by means of a CAD of Autodesk Inventor Professional is considered. The technique and technology of computer simulation of a frame of the electrical scooter is provided. The analysis for three configurations of model of a frame of the electrical scooter on the basis of the finite-element method is made. Optimization on elements of construction and materials is performed.

Keywords: parametric model, electric scooter frame, computer simulation

Введение. Электрические транспортные средства необходимо рассматривать как неотъемлемая часть будущих устойчивых транспортных систем в умных городах и районах, в целях эффективного сокращения выбросов углерода и зависимости от ископаемого топлива, а также пробки в основном в городских районах. В поддержку перехода к электрификации транспорта «Парижская декларация о мобильности и изменении климата и призыве к действию» определила цель более чем 100 миллионов электромобилей (электронные автомобили) и 400 миллионов электрических двух- и трехколесных электроскутеров, которые должны быть задействованы в глобальном масштабе к 2030 году.

Основной несущей конструкцией электроскутера является рама. Назначение рамы электроскутера состоит в фиксации двух или более колес в структуру с жесткостью на изгиб и кручение, то есть такую, которая не будет

прогибаться и скручиваться. Рама должна выдерживать все компоненты конструкции, пассажиров и багаж, а также вбирать в себя все действующие на неё нагрузки без чрезмерных отклонений.

Постановка задания. Современные компьютерные технологии при проектировании рамы электроскутера позволяют:

- сократить затраты времени
- повысить точность
- создать параметрическую компьютерную модель
- провести анализ механических нагрузок.

Проектирование рамы возможно в разных CAD системах. Пример компьютерной модели рамы спортивного автомобиля представлено в [1], но в этой работе не представлена технология создания модели. Эту задачу удобней решить с помощью САПР Autodesk Inventor Professional, что показано на примере рамы спортивного автомобиля в [2]. САПР Autodesk Inventor Professional позволяет создать параметрическую трёхмерную модель пространственной рамы электроскутера в разделе «Проектирование рам». Параметризация позволяет проводить анализ построенной модели для различных профилей элементов конструкции. Важнейшей целью проектирования рамы должно быть обеспечение безопасности водителя и пассажира, а уже потом её эффективность как конструкции соединения основных узлов электроскутера. Конструкция рамы должна быть эффективной, следовательно, достаточно жёсткой, что также способствует повышению уровня её безопасности. Эти две цели достигаются подобными методами, разница только в местах применения. Для анализа созданной модели рамы необходимо проведение симуляции нагрузок на отдельные элементы и раму в целом для её разных модификаций.

Основы методики и технологии создания трёхмерной параметрической каркасно-векторной модели рамы электроскутера рассмотрены в работах [3 – 6].

Целью данной работы является рассмотрение общего подхода к созданию трёхмерной параметрической каркасно-векторной модели рамы электроскутера и анализа нагрузок на элементы конструкции созданной модели рамы. Для этого необходимо проведение симуляции, распределенной и точечной нагрузок на элементы конструкции рамы.

Результаты исследования.

При создании модели электроскутера необходимо выполнить модель основной (базовой) части рамы, а затем создать группы элементов, которые позволят укрепить общую надёжность конструкции. Данный метод позволит провести поэтапный анализ конструкции на жёсткость и надёжность.

Технология построения пространственной рамы содержит особенности по сравнению со сборками, выполненными из обычных смоделированных деталей.

1. Для того чтобы модель можно было тестировать в среде «Анализ рам», она должна быть создана из специальных профильных элементов.

2. Для задания стандартного профиля необходимо предварительно созданный эскиз, который добавляется в среду сборки в качестве компонента (профиль задаётся только в среде сборки).

3. Для модели необходимо существование нескольких подуровней детализации (сборка в сборках). Это позволяет расширить свободу контроля над разными компонентами и уровнями детализации.

Методика создания модели рамы состоит из нескольких этапов.

На первом этапе создаём трёхмерную эскиз каркасно-векторной модели рамы, который создан из эскизов модели базовой части рамы, эскизов элементов сиденья и багажника и элементов жёсткости.

На втором этапе проводим профилирование базовой части и поперечных элементов рамы и профилирование элементов жёсткости.

На третьем этапе проводим соединение компонентов в параметрическую трёхмерную модель пространственной рамы.

Для созданной модели проводим анализ механических усилий на раму. Рассмотрим этапы подробно.

Моделирование начинается с создания эскиза основания рамы. Создаём новый локальный проект под названием «Frame». На экране открываются трёхмерная среда детали. Выбирая команды «Создать 2D-эскиз», «Создать 3D-эскиз» и добавляя вспомогательные плоскости построения создаём элементы эскиза, задавая с помощью размеров необходимые параметрические зависимости. Эскиз основы рамы электроскутера представлен на Рисунке 1.

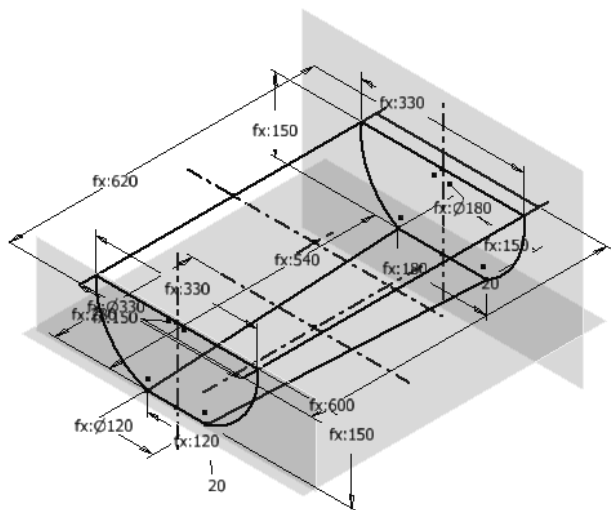


Рисунок 1. Эскиз основы рамы электроскутера

Добавляем эскизы для сиденья водителя, багажник и крепление руля. Объединяем их в один эскиз (Рисунок 2).

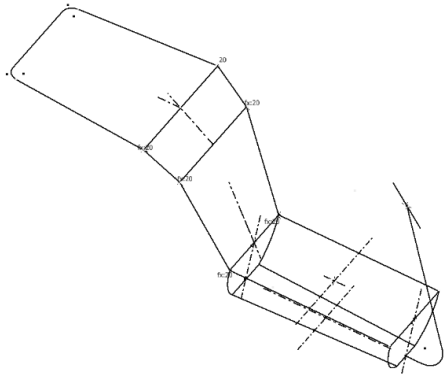


Рисунок 2. Эскиз модели рамы без ребер жёсткости.

Полученная линейная рама полностью соответствует заданию, предложенному заказчиком, следовательно, это только исходные данные для дальнейшей доработки. В конструкции не хватает элементов жёсткости, в данном виде она чувствительна к нагрузкам. Наиболее подходящим для пространственной рамы будет введение диагональных инсталляций в конструкцию. Для реализации поставленной задачи, создаём модели инсталляций в отдельном файле .ipt, что позволит добавлять их в новые конфигурации рамы. Для каждого из следующих компонентов используем копию ранее смоделированной эскизной рамы для более удобного задания зависимостей в финальной сборке.

Элементами жёсткости сделаем боковые подпорки задней секции рамы для поддержки багажной части. Для этого открываем копию эскизной рамы и проведем диагональные линии в выбранной нами локации (Рисунок 3).

Созданный эскиз является каркасно-векторно-параметрическим потому, что он:

1. Создан с помощью простейших каркасных элементов.
2. Каркас векторный потому, что направления создания элементов каркаса будет использоваться при их профилировании.
3. Каркас параметрический потому, что все размеры связаны и размещаются в таблице параметров эскиза.

Создаем трехмерную модель на основе каркасно-векторной модели. Последним шагом моделирования будет создание главного файла сборки. В нём будет проведено профилирование основания рамы и присоединения всех необходимых компонентов.

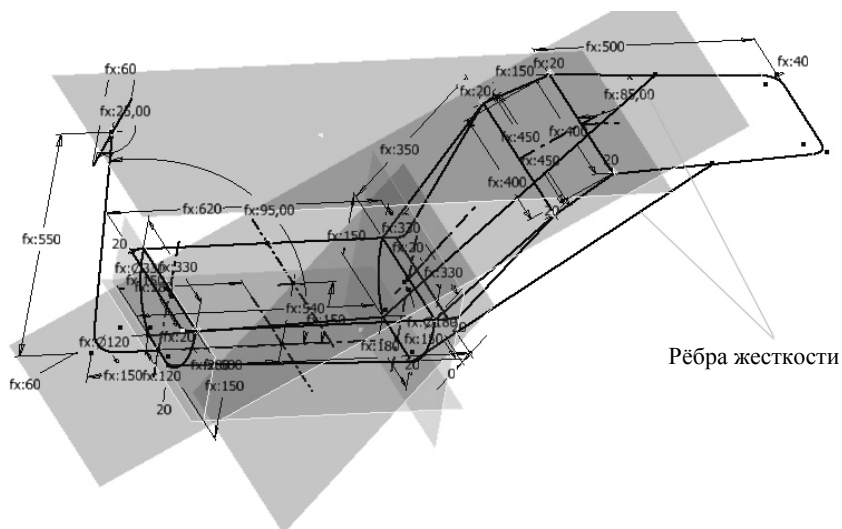


Рисунок 3. Окончательный вид эскиза модели.

Открываем шаблон `lam`, и вставляем раму, она будет фиксированным компонентом. Присоединение профилей происходит одинаково для всех элементов (Рисунок 4).

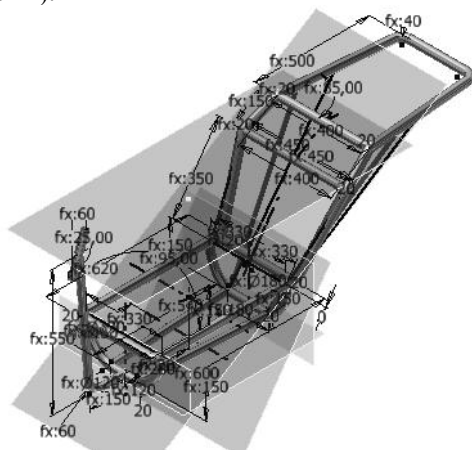


Рисунок 4. Основная часть рамы (объёмная)

Вставляем созданные инсталляции, пользуясь зависимостью типа «Совмещение» по совпадению точки и прямой. В окончательном виде рама будет иметь все существующие элементы (Рисунок 5).

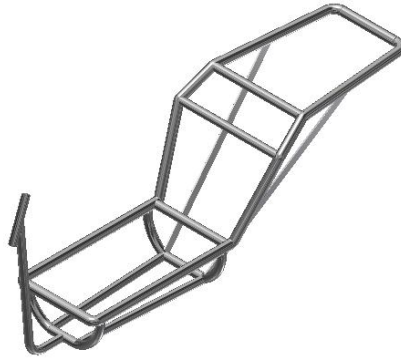


Рис. 5 Окончателный вид рамы (эскизы скрыты)

В системе Autodesk Inventor «Анализ рам» используется для исследования структурной целостности рамы по отношению к деформации и напряжениям, которые возникают под действием нагружения и заданием зависимостей. После задания критериев можно запустить процесс симуляции и увидеть поведение модели в заданных условиях. Симуляция помогает определить проблемы при работе и подобрать для проектов лучшие альтернативные решения.

Балочные элементы являются линейными. Процедура анализа рам не может выполняться по отношению изогнутых балок. По этой причине изогнутые балки система разделяет на небольшие прямолинейные отрезки.

В начале и конце балки каждый балочный элемент имеет шесть ступеней свободы (три вращательных степени свободы и три степени свободы смещения). Узлы на балках определяют важные точки структуры. Например, их можно использовать для задания нагрузок. В модальном анализе узлы могут использоваться для концентрации массы.

В анализе рам существуют следующие ключевые функции:

- структурный статический и модальный анализ одного или нескольких симуляций;
- автоматические адаптивные элементы для контроля точности результатов;
- широкий выбор граничных условий (нагрузок и зависимостей);
- экстенсивные функции, используемые после обработки, для просмотра результатов в режиме 3D и публикации отчётов в Интернете.

При запуске процедуры анализа рам модель сборки генератора рам автоматически преобразуется в балки и узлы. Из выходной модели считывается следующая информация:

- данные про сечения балок;
- материалы, из которых изготовлены балки;

- проверяются ссылки на граничные условия;
- начальные и конечные точки балок соединяются с заданным допуском;
- в отчёте отмечаются несоответствия материалов или неправильные параметры поперечных сечений

Рассмотрим рабочий процесс анализа структуры рамы с использованием процесса «Анализа рам» в Inventor. Открываем сборку, которая содержит компоненты рамы, созданные с помощью инструментов генератора рам.

1. Входим в среду «Анализа рам».
2. Выбираем команду "Создать симуляцию".
3. Настраиваем параметры симуляции. Модель балки автоматически преобразуется в идеальные узлы и балки, предназначенные для выполнения структурного анализа. В графическом окне отображаются балки, узлы и значки центра тяжести. В папке "Статус" браузера показаны несоответствие материалов и некорректные поперечные сечения балок.
4. Исключаем балки и граничные состояния, которые не должны быть задействованы в симуляции.
5. Указать параметры материалов и физические свойства балок, которые берут участие в анализе.
6. Определяем и накладываем зависимости.
7. Определяем место и величину нагрузок.
8. Оцениваем соединения и при необходимости задаем их.
9. Запускаем симуляцию.
10. Просматриваем результаты.
11. Вносим необходимые изменения для усовершенствования сборки. Изменения могут представлять собой добавление узлов, нагрузок и зависимостей или отключение проблематичных узлов, нагрузок и зависимостей.
12. Повторно запускаем симуляцию, чтобы обновить результаты.
13. Повторяем процесс до тех пор, пока компонент не будет оптимизирован.
14. После завершения создаём отчёты на основе полученных результатов.

Первой была исследована рама грузовой конфигурации без ребер жесткости, начальным материалом будет алюминий. Деформации при нагружении на багажную часть рамы для такой конструкции не удовлетворяют требованиям по жёсткости конструкции (Рисунок 6). При отсутствии рёбер жёсткости (Рисунок 6а) большое смещение багажного отделения. Необходимо добавить ребра жёсткости и заменить материал на более прочный. Повторили симуляцию с рёбрами жесткости и материалом – сталь (Рисунок 6б).

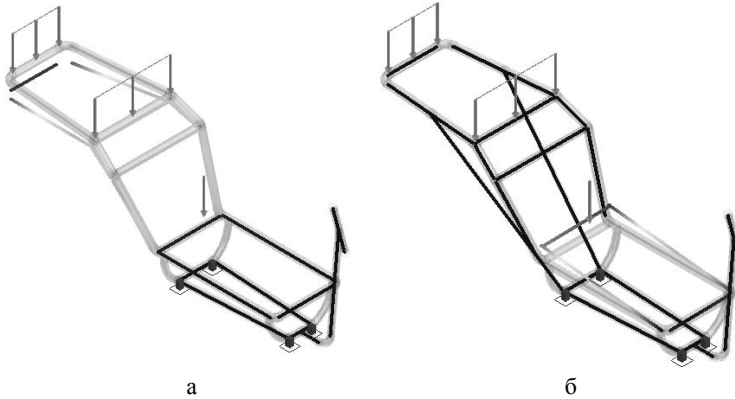


Рисунок 6. Первая конфигурация рамы – нагрузка на багажной части рамы
а) – без ребер жёсткости, б) – с ребрами жесткости

Проводим следующий анализ для этой рамы – боковая нагрузка (рис. 7). Возникают недопустимые деформации, но это уже кручение.



Рисунок 7. Первая конфигурация рамы – боковая нагрузка

Более критичными являются деформации смещения, следовательно, необходимо обязательно устанавливать ребра жесткости и заменить материал. После этого проводим для них аналогичные симуляции.

Следующей конфигурацией скутера будет конфигурация для грузопассажирских перевозок. Она потребовала изменения материала с алюминия на сталь, при этом не нужны ребра жёсткости (Рисунок 8).

Третьей была пассажирская конфигурация скутера. Она наименьшая из представленных конфигураций. Отличием от предыдущих были размеры и форма багажного отделения, место перед водителем, для неё проводим аналогичный анализ, как и для предыдущих конфигураций модели. В результате проведения анализа данной рамы не было выявлено отклонений от нормы поэтому необходимости в элементах жёсткости и замены материала нет.

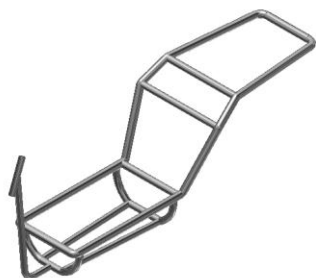


Рисунок 8. Грузопассажирская конфигурация рамы



Рисунок 9. Пассажирская конфигурация рамы

В результате анализа были выявлены отклонения в первой и второй конфигурации рамы, что потребовало добавления элементов жёсткости и альтернативного материала изготовления для поддержки багажного отдела.

При использовании стали почти не изменился характер деформаций, но на несколько пунктов изменилась её амплитуда. При сравнении алюминия со сталью амплитуды деформаций в 2,5 раза больше, но их характер не изменяется. Рама из алюминия имеет значительно меньший вес: 17,4 кг из алюминия против 30,5 кг из стали. Алюминий является компромиссным материалом, который подойдет для нашей рамы. Он относительно дешёвый и легко сваривается (экономичность, лёгкость монтажа), он достаточно легкий и имеет достаточный запас мощности (характер деформаций не изменился). Мы провели оптимизацию конструкции рамы для её различных конфигураций.

Результаты симуляции можно представить в виде отчета, в котором будет содержаться информация в виде эпюр и диаграмм (Рисунок 10), а также в табличном виде (таблицы 1, 2).

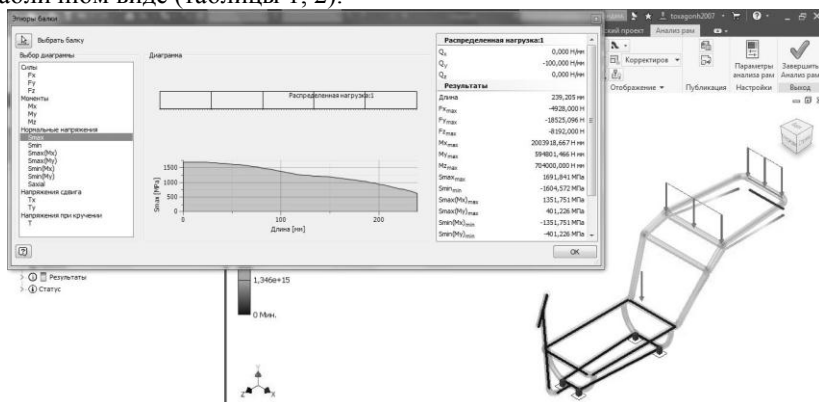


Рисунок 10. Диаграмма при распределённой нагрузке на раму

Таблица 1 Сила и момент реакции в опорах

Имя опоры	Сила реакции		Реактивный момент	
	Величина	Компоненты (Fx,Fy,Fz)	Величина	Компоненты (Mx,My,Mz)
Шарнирно-неподвижная опора:2	3,717 Н	0,000 Н	0,000 Н мм	0,000 Н мм
		3,717 Н		-0,000 Н мм
		0,000 Н		0,000 Н мм
Шарнирно-неподвижная опора:3	3,717 Н	-0,000 Н	0,000 Н мм	-0,000 Н мм
		3,717 Н		-0,000 Н мм
		0,000 Н		0,000 Н мм
Шарнирно-неподвижная опора:4	6,795 Н	0,000 Н	0,000 Н мм	-0,000 Н мм
		6,795 Н		0,000 Н мм
		-0,000 Н		-0,000 Н мм
Шарнирно-неподвижная опора:1	6,795 Н	-0,000 Н	0,000 Н мм	-0,000 Н мм

Таблица 2 Сводка по статическому результату

Имя		Минимальная	Максимальная
Смещение		0,000 мм	1,83838744499290E+11 мм
Силы	Fx	-48,006 Н	63,994 Н
	Fy	-7,117 Н	87,957 Н
	Fz	-20,000 Н	13,337 Н
Моменты	Mx	-4542,257 Н мм	3604,836 Н мм
	My	-1700,650 Н мм	767,357 Н мм
	Mz	-284,912 Н мм	685,425 Н мм
Нормальные напряжения	Smax	-0,012 МПа	5,760 МПа
	Smin	-5,922 МПа	0,043 МПа
	Smax(Mx)	0,000 МПа	4,363 МПа
	Smin(Mx)	-4,363 МПа	-0,000 МПа
	Smax(My)	0,000 МПа	1,633 МПа
	Smin(My)	-1,633 МПа	-0,000 МПа
	Saxial	-0,105 МПа	0,172 МПа
Напряжения сдвига	Tx	-1,004 МПа	0,753 МПа
	Ty	-1,379 МПа	0,112 МПа
Напряжения при кручении	T	-0,329 МПа	0,137 МПа

Полный отчет содержит результаты испытаний по все узловым точкам, опорам и элементам конструкции с учётом материалов и содержит более 50 страниц информации.

Выводы.

В работе предложен общий подход к проектированию и анализу нагрузок пространственной каркасно-векторной параметрической компьютерной модели несущей конструкции (рамы) электрического скутера с помощью САПР Autodesk Inventor Professional. Представлена методика и технология компьютерного моделирования рамы электрического скутера. Выполнен анализ для трех конфигураций модели рамы электрического скутера на базе метода конечных элементов. На основе проведенных исследований была проведена оптимизация конструкции рамы по элементам конструкции и материалам. Используя предложенный подход можно сократить время ресурсы, а также повысить надежность создаваемого изделия. Развитием данной работы будет создание полной компьютерной модели электрического скутера и проведение испытаний на возможные статические и динамические воздействия.

Список использованных источников: 1. S.V. Rusnak, V.V. Khamray, M.A. Novak. Computer simulation and calculation of a sporting car frame. / Праці Одеського політехнічного університету: Науковий та науково-виробничий збірник. – Одеса, 2012. – Вип. 2(39). – С 101-103. 2. В.М. Тонконогий, В.М. Тигарев, К.В. Козирева. Розробка параметричної тривимірної моделі просторової рами автомобіля. // Сучасні технології в машинобудуванні. – Вип. 9, Харків, НТУ "ХПІ", 2014, – С. 216-228. 3. В.М. Тигарев, А.А. Гончаренко Методика створення тривимірної параметричної моделі рами електроскутера. // VIII Міжнародна наукова конференція студентів та молодих вчених «Modern Information Technology 2018»; ОНПУ; ІКС. – Одеса :Екологія, 2018. – С. 146-147. 4. Пурич Д.А., Савельєва О.С., Тонконогий В.М. Експрес-аналіз структурної надійності складних технічних систем з нагрудженим резервуванням. // Збірник наукових праць «Сучасні технології в машинобудуванні». – Харків: НТУ «ХПІ», 2013. – Випуск 8. – С. 272 – 280. 5. Становський А.Л., Тонконогий В.М., Савельєва О.С. Моделювання отказоустойчивости в САПР складних технічних систем. // Резаніє і інструмент в технологічних системах. – Харків: ХПІ, 2007. – Вип. 73. – С. 290 – 295. 6. В.М. Тигарев, А.О.Гончаренко, А.А. Медведєв Розробка технології створення та аналізу параметричної моделі рами електроскутера. // VIII міжнародна науково-практична конференція. – Чернігів: ЧНТУ, 2018. – Т.2. – С. 128 – 129.

Bibliography (transliterated): 1. S.V. Rusnak, V.V. Khamray, M.A. Novak. Computer simulation and calculation of a sporting car frame. / Praci Odeskogo politehnichnogo universitetu: Naukovij ta naukovovo-virobnichij zbirk. – Odessa, 2012. – Vip. 2(39). – S 101-103. 2. V.M. Tonkonogij, V.M. Tigaryev, K.V. Koziryeva. Rozrobka parametrichnoyi trivimirnnoyi modeli prostorovoyi rami avtomobilya. // Suchasni tehnologiyi v mashinobuduvanni. – Vip. 9, Harkiv, NTU "HPI", 2014, – S. 216-228. 3. V.M. Tigarev, A.A. Goncharenko Metodika stvorennya tryohmernoji parametricheskoji modeli rami elektroskutura. // VIII Mizhnarodna naukova konferenciya studentiv ta molodih vchenih «Modern Information Technology 2018»; ONPU; IKS. – Odessa :Ekologiya, 2018. – S. 146-147. 4. Purich D.A., Saveleva O.S., Tonkonogij V.M. Ekspress-analiz struktumoj nadezhnosti slozhnyh tehnichestkih sistem s nagruzhennym rezervirovaniem. // Zbirk naukovih prac «Suchasni tehnologiyi v mashinobuduvanni». – Harkiv: NTU «HPI», 2013. – Vipusk 8. – S. 272 – 280. 5. Stanovskij A.L., Tonkonogij V.M., Saveleva O.S. Modelirovanie otkazoustojchivosti v SAPR slozhnyh tehnichestkih sistem. // Rezanie i instrument v tehnologicheskikh sistemah. – Harkov: HPI, 2007. – Vyp. 73. – S. 290 – 295. 6. V.M. Tigaryev, A.O.Goncharenko, A.A. Myedvedyev Rozrobka tehnologiyi stvorenniya ta analizu parametrichnoyi modeli rami elektroskutura. // VIII mizhnarodna naukovopraktichna konferenciya. – Chernigiv: ChNTU, 2018. – T.2. – S. 128 – 129.

Надійшла до редколегії 25.06.2018

УДК 004.422.83

В.М.Тонконогий, д-р техн. наук, І.С. Сінько, канд. техн. наук,
М.І. Замятін, канд. техн. наук, Д.Д. Ланова, А.О. Панченко, Одеса, Україна.

ПРОЕКТУВАННЯ ТА РОЗРОБКА ПРОГРАМИ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ЮВІЛЕЙНОЇ МЕДАЛІ ДО 100-РІЧЧЯ ОНПУ

В статті розроблено технологічний процес виготовлення моделі медалі на верстаті з ЧПУ. Проведено аналіз стандартної управляючої програми виготовлення моделі, виявлено її недоліки: безперервність роботи верстата від початку процесу різання до його закінчення; відсутність можливості оптимізувати режими обробки медалі у залежності від складності геометричних елементів. Розроблено управляючу програму для фрезерно-гравірувального верстата, що усуває перераховані недоліки. Описано технологічний процес виготовлення медалі з використанням управляючої програми та виконана практична реалізація за допомогою адитивних технологій.

Ключові слова: технологічний процес, керуюча програма, виготовлення медалі

В статье разработан технологический процесс изготовления модели медали на станке с ЧПУ. Проведен анализ стандартной управляющей программы изготовления модели, обнаружено её недостатки: непрерывность работы станка от начала процесса резания до его окончания; отсутствие возможности оптимизировать режимы обработки медали в зависимости от сложности геометрических элементов. Разработана управляющая программа для фрезерно-гравировального станка, которая устраняет перечисленные недостатки. Описан технологический процесс изготовления медали с использованием управляющей программы и выполнена практическая реализация с помощью аддитивных технологий.

Ключевые слова: технологический процесс, управляющая программа, изготовление медали

In this article was developed the technological process of manufacturing a model of a medal on a CNC machine. The analysis of the standard control program for the manufacture of the model has been carried out, its shortcomings have been revealed: the continuity of the work of the machine from the beginning of the cutting process to its end; there is no possibility to optimize the modes of processing the medal depending on the complexity of the geometric elements. A control program for the milling and engraving machine has been developed, which eliminates the listed shortcomings. The technological process of manufacturing a medal using a control program is described and practical implementation is realized with the help of additive technologies.

Keywords: technological process, control program, manufacturing of a medal

Практична реалізація спроектованих об'єктів, обумовлена «інформаційним вибухом» ХХІ століття, потребує теоретичного осмислення і полягає у володінні прикладними програмами для забезпечення контролю процесів автоматизованого проектування.

В сучасному середовищі активне використання інформаційних технологій та новітніх програм для моделювання стали необхідною умовою для швидкої та детальної практичної реалізації моделі. Крім цього, використання програм науково-технічного профілю може слугувати основою для композиційного моделювання і значно полегшити виконання технологічного процесу.

Метою статті є проектування тривимірної моделі медалі з урахуванням особливостей композиційних розрахунків і практична реалізація проекту, яка полягає у виготовленні медалі за допомогою фрезерно-гравірувального верстата.

Наукова новизна статті полягає в удосконаленні підходу до використання адитивних технологій реалізації проекту моделі медалі.

Серед всього різноманіття існуючих програм для моделювання слід звернути особливу увагу на провідне програмне забезпечення для проектування об'ємних рельєфів – ArtCAM. Основною перевагою використання пакету ArtCAM є втілення ідей в готові вироби набагато швидше, ніж це можливо при використанні звичайних методів. Саме цей програмний пакет дозволяє на основі плоских зображень автоматично генерувати просторові 3D-моделі (рельєфи) і обробляти їх на верстатах з ЧПУ [1-2].

Для побудови композиційної схеми було обрано всесвітньо відому САПР AutoCAD, що використовується для двовимірного та тривимірного проектування об'єктів різної складності.

Але окрім проектування моделі, на сьогоднішній день, дуже важливим залишається питання зчитування цифрової віртуальної 3D моделі з наступною побудовою фізичного об'єкта. Саме для таких цілей використовується Roland MDX-40A – універсальний фрезерно-гравірувальний верстат компанії Roland. Основними перевагами даної машини є наявність нескладних, дуже зручних і багатофункціональних інструментів [3].

У ході проведення аналізу стандартної управляючої програми виготовлення моделі, було виявлено наступні недоліки: безперервність роботи верстата від початку процесу різання до його закінчення; відсутність можливості оптимізувати режими обробки медалі у залежності від складності геометричних елементів. Виникла потреба в підвищенні якості та швидкодії існуючих методів обробки поверхні моделі. Крім цього є необхідність у зменшенні обсягу керуючої програми станку.

Основні цілі статті: виконання аналізу існуючих САПР для проектування моделі медалі; вивчення вимог до створення та практичної реалізації моделі медалі; виконання композиційного проектування та побудова тривимірної моделі медалі. Крім цього необхідно описати технологічний процес виготовлення, розробити управляючу програму для фрезерно-гравірувального верстата та виконати практичну реалізацію за допомогою адитивних технологій.

Першим кроком до створення моделі медалі є побудова композиційної схеми [4–7], що виконано в системі автоматизованого проектування AutoCAD (рисунок 1 – 5). Форма диска – сама економічна форма, у якій найменша поверхня, при найбільшому обсязі на оболонку, отже необхідно менше

матеріалу, ніж на будь-яку іншу форму [4]. Диск легко пристосовується до навколишніх умов, так як легко перекоцується, сплющується, і тому ця форма широко поширена в органічному світі (ікринки, віруси, найпростіші мікроорганізми) [8]. Диск, коло, овал – форми, що найбільш часто зустрічаються в творах мистецтва, оскільки відображають реальні форми, властиві природі. Вони легко сприймаються візуально, так як зорове поле сааме має форму овалу і так як в цих формах найкращим чином відбивається уявлення про цілісність, завершеність, на протигагу, наприклад, формам прямокутним, які навпаки, асоціюються з чимось обмеженим та умовним [9].

На основі цих властивостей, доцільним буде використання саме форми диска, що побудовано за принципом «золотого перетину» для створення моделі медалі. Відношення між різницею діаметрів дисків a і b також має значення, що відповідають «золотому перетину»:

$$2 * \frac{0,8}{0,6} = 2 * 1,3; \frac{b}{c} = \frac{1,6}{1,2} = 1,3; \frac{d}{e} = \frac{5,4}{4,1} = 1,3 \quad (1)$$

Розмір елементу канта, що виступає, виконано за розрахунком:

$$2 \cdot \frac{0,8}{0,6} = 2 \cdot 1,3 \quad (2)$$

Моделювання зворотного боку медалі також виконано за допомогою використання форми диска:

$$\frac{f}{d} = \frac{6,6}{4,1} = 1,618; \frac{f}{g} = \frac{6,6}{4} \approx 1,6 \quad (3)$$

Логотип медалі вписано в коло, радіус якого рівен 0,5 від габаритного радіусу медалі.

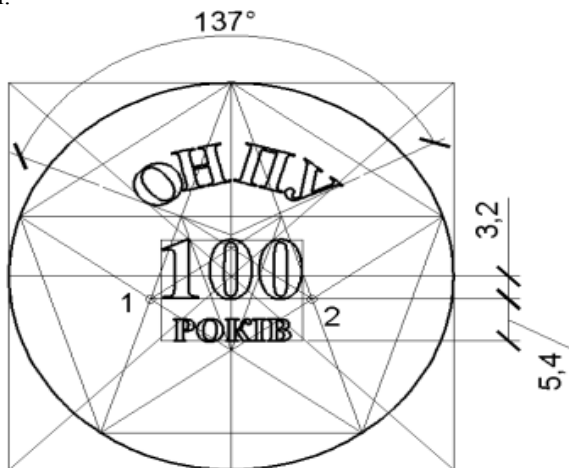


Рисунок 1 – Композиційна побудова напису згідно з розрахунком «золотого перетину»

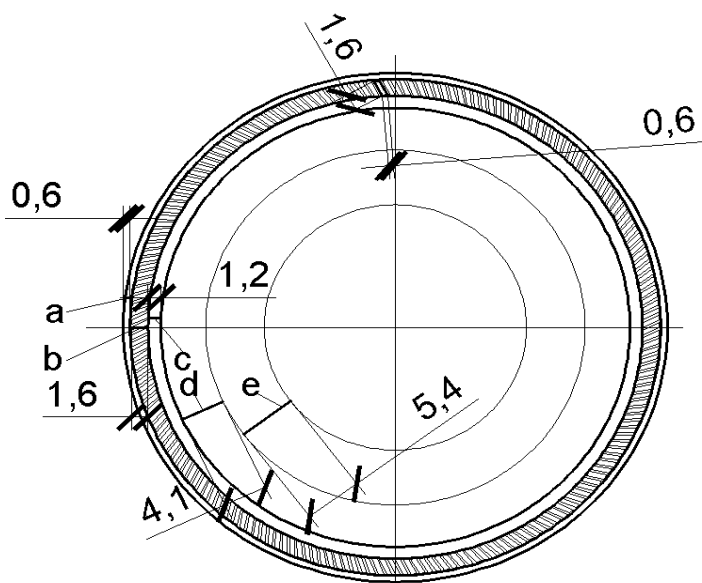


Рисунок 2 – Композиційна побудова за допомогою форми диска

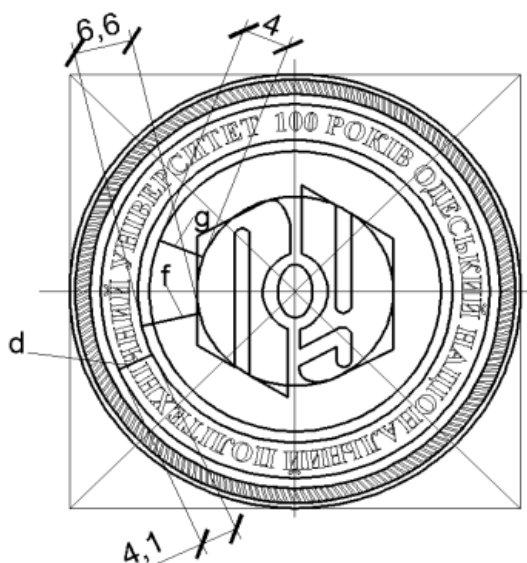


Рисунок 3 – Композиційна побудова зворотного боку медалі

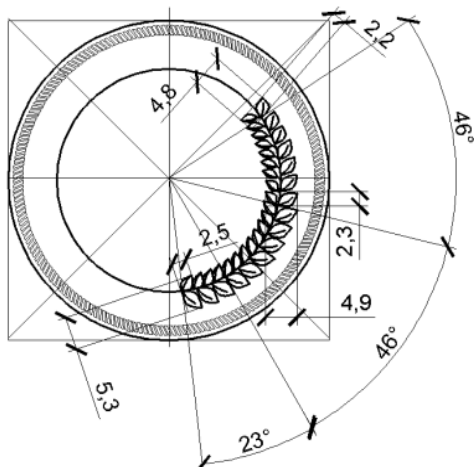


Рисунок 4 – Використання зміни масштабу елементів



Рисунок 5 – Побудова дзеркальної симетрії відносно композиційного центру

Для тривимірного моделювання застосовано програмний пакет ArtCAM, що дозволяє на основі плоских зображень автоматично генерувати просторові 3D-моделі (рельєфи) і обробляти їх на верстатах з ЧПУ. Використано набір інструментів програми, що містить функціонал, який дозволяє реалізувати проект, починаючи з ескізу, і закінчуючи виготовленням готових виробів, що значно полегшує процес розробки, редагування та обробки на верстатах з ЧПУ моделей (рисунок 6). Для механічної обробки рельєфу медалі використовуємо – чорнову і чистову обробки. ArtCAM пропонує набір різних стратегій для кожного з видів обробки. Стандартний підхід полягає у виборі стратегії обробки різального інструменту для всієї поверхні моделі.



Рисунок 6 – Тривимірна модель медалі

Одна з найважливіших складових для отримання рельєфу, максимально близького до рельєфу необхідної моделі – управляюча програма для даного верстата з ЧПУ. Тому після розрахунку траєкторій складемо управляючі програми для чорнкової і чистової обробок. Управляюча програма з верстата являє собою набір службових команд верстата і координати вузлових точок, розрахованих на попередньому етапі, за якими буде здійснюватися переміщення інструменту[10].

У процесі розрахунку траєкторій інструменту для чистової обробки, ArtCAM розрізає модель на шари в площині XZ з кроком по осі Y рівним кроку растра чистової обробки, в нашому випадку 0,04 мм. Отриманий перетин, з урахуванням даних по 3D рельєфу, ArtCAM апроксимує в шматково-лінійну функцію із заданою точністю. Далі, вузлові точки даної функції використовуються для написання управляючої програми.

Дана методика розрахунку не є оптимальною для виготовлення моделі. Рельєф аверсу медалі можна розбити на кілька зон по їх складності, за якими буде здійснюватися переміщення інструменту.

Для розрахованої траєкторії було написано управляючу програму. Дана програма здійснює обробку заданої зони на глибині 0,2 мм. Для того, щоб отримати весь необхідний профіль, необхідно зациклити програму, кожен раз заглиблюючись на величину кроком 0,2 мм, поки не буде досягнута фінішна глибина. Для того, щоб провести обробку по всій глибині необхідно змінити управляючу програму в такий спосіб – використовуючи написану в Artcam програму (в якості основи), необхідно її повторювати стільки разів, заглиблюючись на 0,2 мм, поки не буде досягнута повна глибина всього профілю. Для цього використовуємо функцію умовного переходу в програмі. Блок-схема роботи програми представлено на рисунку 7.

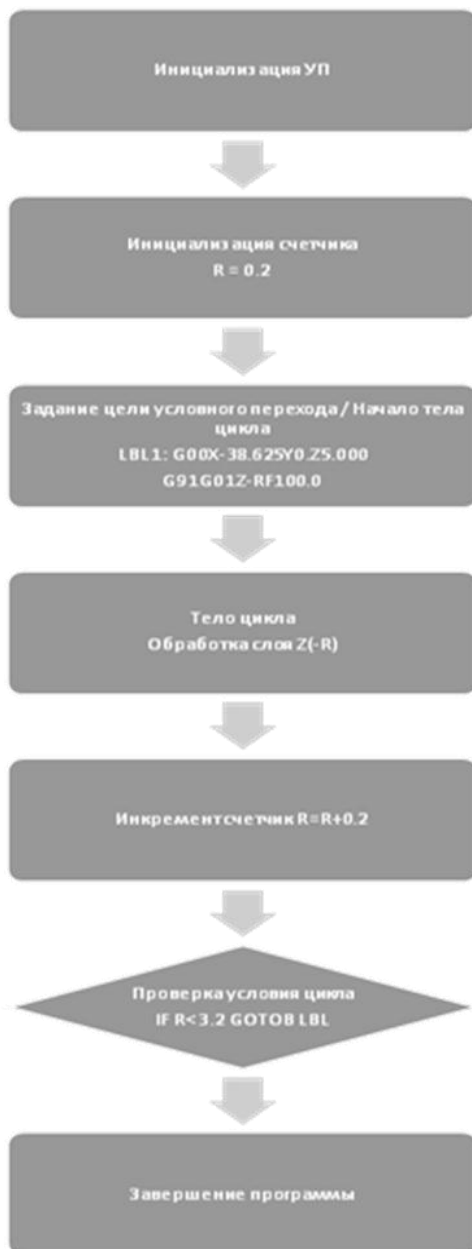


Рисунок 7 – Блок-схема работы керуючої програми

Описана і виконана робота дозволяє зробити наступні висновки. Розглянуто вимоги до створення та практичної реалізації моделі медалі. Виконано аналіз існуючих програм для проектування моделі медалі: композиційне проектування виконано за допомогою САПР AutoCAD, тривимірне моделювання моделі медалі у системі ArtCAM. Розроблено технологічний процес виготовлення моделі на верстаті з ЧПУ. Проведено аналіз стандартної управляючої програми виготовлення моделі, виявлено її недоліки: безперервність роботи станку від початку процесу різання до його закінчення; відсутність можливості оптимізувати режими обробки медалі у залежності від складності геометричних елементів. Розроблено управляючу програму для фрезерно-гравірувального верстата, що усуває перераховані недоліки. Описано технологічний процес виготовлення медалі з використанням управляючої програми та виконана практична реалізація за допомогою адитивних технологій.

Список використаних джерел: 1. ArtCAM на службе современных технологий деревообработки [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://sapr.ru/article/18156>. 2. Возможности программы ArtCAM при работе с фрезерным станком с ЧПУ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://infofrezer.ru/stati/vozmozhnosti-programmy-artcam-pri-rabote-s-frezernym-stankom-s-chpu>. 3. Фрезерные станки [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://rdm24.ru/products/frezernye-stanki/mdx-40a/>. 4. Григорян Е.А. Основы композиции в прикладной графике [Текст] / Е.А. Григорян – Ереван, 1986. – 32 с. 5. Одноралов Н.В. Техника медальерного искусства [Текст] / Н.В. Одноралов – М.: Изобразительное искусство, 1983. – 160 с. 6. Сомов Ю.С. Композиция в технике [Текст] / Ю.С. Сомов – М.: Машиностроение, 1987. – 288 с. 7. Стахов А.П. Коды золотой пропорции [Текст] / А.П. Стахов – М.: Радио и связь, 1984. – 155 с. 8. Єдність форм органічного світу. Законімірності предметного світу [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://ni.biz.ua/3-2/6939.html>. 9. Основы дизайна в маркетингу [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://elib.hduht.edu.ua/bitstream/123456789/1567/1/Дизайн_в_маркетингу.pdf. 10. Принцип системы ЧПУ (числового программного управления) фрезерных станков [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://infofrezer.ru/stati/printsip-sistemy-chpu-chislovogo-programmnogo-upravleniya-frezernykh-stankov>

Bibliography (transliterated): 1. ArtCAM na sluzhbe sovremennyh tehnologiy derevoobrabotki [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://sapr.ru/article/18156>. 2. Vozmozhnosti programmy ArtCAM pri rabote s frezernym stankom s ChPU [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://infofrezer.ru/stati/vozmozhnosti-programmy-artcam-pri-rabote-s-frezernym-stankom-s-chpu>. 3. Frezernye stanki [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://rdm24.ru/products/frezernye-stanki/mdx-40a/>. 4. Grigoryan E.A. Osnovy kompozicii v prikladnoj grafike [Tekst] / E.A. Grigoryan – Erevan, 1986. – 32 s. 5. Odnorolov N.V. Tehnika medalernogo iskusstva [Tekst] / N.V. Odnorolov – M.: Izobrazitelnoe iskusstvo, 1983. – 160 s. 6. Somov Yu.S. Kompoziciya v tehnike [Tekst] / Yu.S. Somov – M.: Mashinostroenie, 1987. – 288 s. 7. Stahov A.P. Kody zolotoj proporcii [Tekst] / A.P. Stahov – M.: Radio i svyaz, 1984. – 155 s. 8. Yednist form organichnogo svitu. Zakonomirnosti predmetnogo svitu [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <http://ni.biz.ua/3-2/6939.html>. 9. Osnovi dizajnu v marketingu [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: http://elib.hduht.edu.ua/bitstream/123456789/1567/1/Dizajn_v_marketingu.pdf. 10. Princip sistemy ChPU (chislovogo programmnogo upravleniya) frezernykh stankov [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://infofrezer.ru/stati/printsip-sistemy-chpu-chislovogo-programmnogo-upravleniya-frezernykh-stankov>

Надійшла до редколегії 25.06.2018

УДК 004.422.83

В.М. Тонконогий, д-р техн. наук, И.С. Синько канд. техн. наук,
Э.А. Махиянова, А.Ю. Миткова, Одесса, Украина

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПОМЕЩЕНИЙ С АКУСТИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ

У статті розглядається розробка математичної моделі проектування приміщень з акустичними властивостями. Модель дозволяє розрахувати відображення звукових хвиль від поверхонь різної складності і підвищити точність результатів проектування.

Ключові слова: математична модель, акустичні параметри, звукові хвилі, програмний додаток.

В статье рассматривается разработка математической модели проектирования помещений с акустическими свойствами. Модель позволяет рассчитать отображения звуковых волн от поверхностей различной сложности и повысит точность результатов проектирования.

Ключевые слова: математическая модель, акустические параметры, звуковые волны, программное приложение.

The article discusses the development of the design space models with acoustic properties. The developed model makes it possible to calculate the geometric reflection of sound waves on surfaces of varying complexity and improve the accuracy of the results at the design stage.

Key words: mathematical model, acoustic parameters, sound waves, software application.

Акустика является важным элементом в строительстве абсолютно всех типов зданий. Строительные компании на первом этапе разработки проекта учитывают акустические свойства материалов. В этом случае речь идет о максимальном поглощении звука в здании. Чтобы минимизировать шум используют в несущих стенах различные шумоизоляционные материалы, звуковое поглощение которых будет стремиться к максимальному значению. В качестве источника звука рассматривается промышленное оборудование. Учитывая его расположение, план помещения, материалы в статье выполнена математическая модель звуковых волн, на основе которой создано программное приложение [1, 2].

Целью является разработка программного приложения математической модели для проектирования помещений с акустическими свойствами. Программное приложение выполняет тестирование математической модели на компьютерной модели помещения, что поможет выполнить коррекции параметров помещения на стадии проектирования и избежать ошибок при дальнейшей реализации проекта. Программный код моделирует направление волн, благодаря этому есть возможность корректировать архитектуру помещения, материалы [3, 4]. Так же помимо усиления давления звуковой волны, есть надобность в максимальном поглощении ненужного шума.

Для того чтобы достичь поставленной цели необходимо выполнить следующие задачи:

- разработать геометрическую модель распространения звуковых волн в помещении;
- разработать математическую модель распространения звуковых волн в помещении;
- разработать программное приложение в системе САПР AutoCAD моделирования звуковых волн с учетом физических свойств материалов поверхностей помещения.

Основой для разработки программного приложения является математическая и геометрическая модели отражения звуковых волн от поверхностей. Правильный выбор математического метода для создания математической модели поможет прогнозировать динамику волн и разработать программное приложение в системе САПР, что позволит с максимальной точностью предусмотреть поведение звуковой волны.

Явления отражения, поглощения или рассеивания происходит при попадании на любую поверхность. Характер такого поведения можно создать в виде геометрической модели [4]. Когда волна попадает на плоскость, являющейся границей двух сред с разными свойствами происходит эффект зеркального отражения волны. Существует явление, которое называется звуковым полем, когда в помещениях звук распространяется от источника звука к поверхностям, от которых волны отражаются несколько раз.

В некоторых случаях звуковые волны рассматриваются, как звуковые лучи, в геометрической оптике такие лучи аналогичны световым лучам. В строительной акустике широко применяются построение геометрических отражений:

- угол падения звукового луча равен углу его отражения;
- падающие и отраженные лучи лежат в одной плоскости перпендикулярной к плоскости отражения.

В зависимости от границы отражения, длины звуковой волны и расположение поверхности относительно источника звука существует возможность использования метода лучевых (геометрических) отражений. Объект, поверхность которого служит отражением, должен иметь массу не менее 20 кг/м^2 , а его коэффициент поглощения не должен превышать 0,1.

На рис.1. в роле границы выступает плоская прямоугольная поверхность, центр которой совпадает с точкой О, являющейся точкой геометрического отражения. В качестве источника звука выступает точка S. Лучевая плоскость Р параллельна стороне α , на лучевой плоскости лежат лучи SO и FO, FO является отраженным лучом, DO является нормалью. K_0 принимается как расстояние между источником и поверхностью, К – расстояние отражения, L – это углы падения и отражения звукового луча.

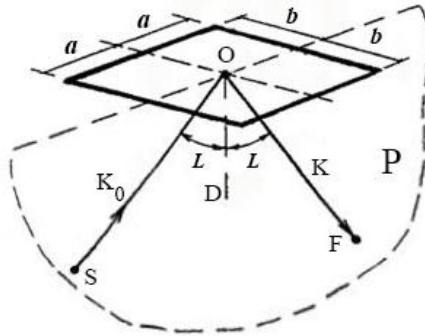


Рисунок 1 – Отражение звуковой волны от плоской поверхности

Отражение от сферических и цилиндрических поверхностей моделируется путем разбиения этих поверхностей на сегменты, вследствие чего получаем плоские поверхности [4 ,5]. Пример разбиения и отражения таких поверхностей представлены на рис.2, 3.

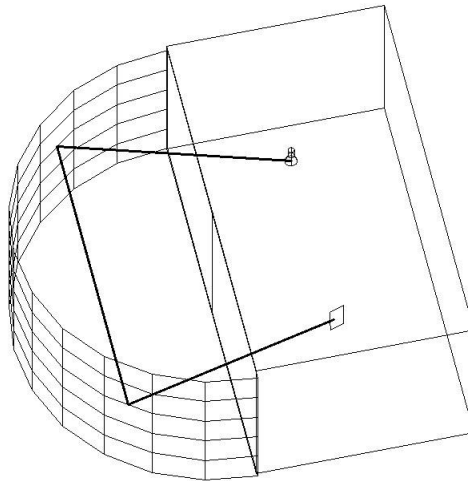


Рисунок 2 – Отражение звуковой волны от цилиндрической поверхности

Для создания математической модели акустики помещения был проведен анализ математических методов и выбран метод конечных элементов. Данный метод является основой для современных программных продуктов, используется для расчета на ЭВМ. Суть метода объясняется его названием, то есть двухмерная или трехмерная область разбивается на конечные элементы (малые, но конечные области), такой процесс разбивки называют дискретизацией. Естественно, деформация может иметь различные

формы, это будет зависеть от типа строения модели помещения. Условие совместимости возможно только в узлах, в других точках это условие применимо приближенно. Степень свободы узла и количество узлов могут быть различными, но они не могут быть меньше того минимума, который нужен для анализа напряженности и деформации модели. Степень свободы определяется количеством перемещений, возможных независимо друг от друга. Данный термин является важным в методе конечных элементов. Следует отметить, что указанный метод является гибким и алгоритмизированным в большей степени, по сравнению с другими методами, в описании граничных условий какой-либо области [6, 7].

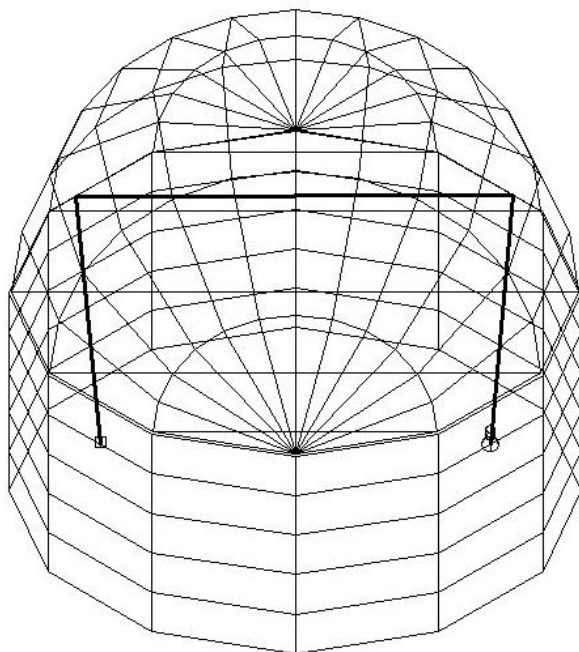


Рисунок 3 – Отражение звуковой волны от сферической поверхности

МКЭ делят на четыре метода:

- Прямой метод является простым и удобным, но применим для КЭ простых геометрических фигур, с небольшим количеством перемещений в узле. Основой метода являются положения, которые были разработаны в начале развития метода конечных элементов. Именно этот метод МКЭ и был выбран для создания математической модели.

- Вариационный метод может быть применен к простым и сложным задачам. Он основан на неизменности переменной, находящейся в зависимости от нескольких или одной функции.

- Метод навязок состоит в ведении навязок (отклонении аппроксимативного решения от точного). Для того чтобы получить более точное решение, нужно свести интеграл к минимуму от навязок области расчета.

- Метод энергетического баланса основан на балансе разных видов энергии в интегральной форме, используется для динамических и линейных задач.

Результаты расчетов несут за собой приближенные значения, т.к. аппроксимация дает не точное значение требуемых величин. Точность рассматривают как отклонения решения от верного решения. Устойчивость является повышением ошибок при отдельном расчете. Сходимость характеризуется решениями постепенно подведенными к предельному [8].

Ошибки метода конечных элементов:

- ошибки дискретизации, различия реальными значениями рассчитываемой области и аппроксимацией;
- ошибки аппроксимации, разность между реальным распределением требуемых функций и их изображением благодаря функции аппроксимации.

Алгоритм расчета метода конечных элементов представляет собой матричные операции, расчеты выполняются с помощью информационных технологий.

Общий алгоритм расчета:

- Дискретизация конструкций, область рассматривается как некоторое число КЭ, соединенные в узловые точки, при этом элементы имеют разную геометрическую форму. В целом не существует каких-либо правил по разбивки на элементы, но при этом неравномерное разбиение может причинить трудности. Следовательно, данный этап предполагает: выбор типа конечных элементов, разбиение на конечные элементы, описание элементов, описание узлов, описание нагрузок и перемещение в узлах.

- Глобальные матрицы жесткости и вектора узловых сил основано на создании отдельных элементов и их расположения, с помощью обхода каждого КЭ. Существует три способа расположения элементов: сложение жесткостей, преобразование, конечно-разностные операторы. Следовательно, второй этап состоит из: формирование элементов матрицы жесткости, трансформация элементов в глобальную систему координат (но если локальная и глобальная совпадает, данная операция не нужна), размещение элементов матрицы жесткостей в глобальной МЖ.

- Заданные граничные условия принимаются во внимание при создания вектора нагрузки, размещение заменяется аналогичными узловыми силами, чтобы уменьшить погрешность нужно разбить конструкцию на мелкие элементы. Кинематические граничные условия принимаются как заданные узловые перемещения. Таким образом третий этап состоит представляет собой: замещение нагрузки на подобные узловые силы,

добавление матрицы жесткости с учетом основания, исправление глобальной системы уравнений, с учетом узловых смещение, трансформирование глобальной системы уравнений, с учетом опорных связей.

– Система разрешающих уравнений представляет собой систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), матрицей коэффициентов ленточной структуры. Матрица коэффициентов СЛАУ представляется ленточной структуры при рациональной нумерации узлов, это обуславливается тем, что нулевые коэффициенты содержатся только в ленте диагонального расположения. Весомым фактором принимается большое количество ошибок при округлении в расчете СЛАУ большого количества уравнений. Таким образом выдвигаются две независимые процедуры: сведение матрицы коэффициентов системы линейных алгебраических уравнений к треугольному виду, нахождение решений систем с треугольными матрицами для вектора нагрузки.

– Определение напряжений, решение состояния напряжений рассчитывается следующим образом: создается вектор узловых перемещений для отдельных КЭ, в случаи несовпадения глобальной и локальной системы координат создается перевод вектора перемещения узлов, создается матрица напряжений для конечных элементов, в основе которой лежат физические и геометрические соотношения, вычисление вектора внутренних напряжений, связанный с перемещениями в узлах [9, 10].

Для математической модели был выбран четырехугольный, четырехузловой конечный элемент (рис. 4) [6].

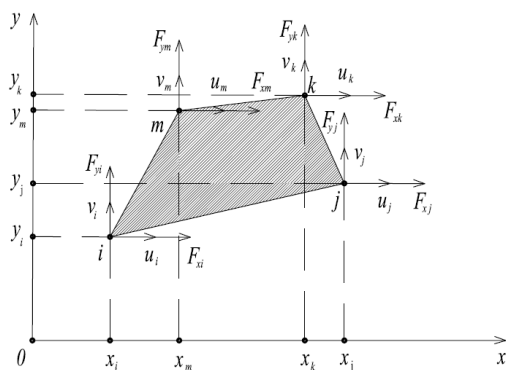


Рисунок 4 – Четырехугольный, четырехузловой конечный элемент

Поле смещений на нём можно аппроксимировать неполным квадратичным полиномом

$$u(x, y) = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y + \alpha_4 xy ; \quad (1.1)$$

$$v(x, y) = \beta_1 + \beta_2 x + \beta_3 y + \beta_4 xy . \quad (1.2)$$

Неизвестные параметры $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ и $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ находятся из условий:

$$\begin{cases} u(x_i, y_i) = u_i; \\ u(x_j, y_j) = u_j; \\ u(x_k, y_k) = u_k; \\ u(x_m, y_m) = u_m; \end{cases} \quad (1.3)$$

$$\begin{cases} v(x_i, y_i) = v_i; \\ v(x_j, y_j) = v_j; \\ v(x_k, y_k) = v_k; \\ v(x_m, y_m) = v_m; \end{cases} \quad (1.4)$$

с учётом выражений (1.1) и (1.2)

$$\begin{cases} \alpha_1 + \alpha_2 x_i + \alpha_3 y_i + \alpha_4 x_i y_i = u_i; \\ \alpha_1 + \alpha_2 x_j + \alpha_3 y_j + \alpha_4 x_j y_j = u_j; \\ \alpha_1 + \alpha_2 x_k + \alpha_3 y_k + \alpha_4 x_k y_k = u_k; \\ \alpha_1 + \alpha_2 x_m + \alpha_3 y_m + \alpha_4 x_m y_m = u_m; \end{cases} \quad (1.5)$$

$$\begin{cases} \beta_1 + \beta_2 x_i + \beta_3 y_i + \beta_4 x_i y_i = v_i; \\ \beta_1 + \beta_2 x_j + \beta_3 y_j + \beta_4 x_j y_j = v_j; \\ \beta_1 + \beta_2 x_k + \beta_3 y_k + \beta_4 x_k y_k = v_k; \\ \beta_1 + \beta_2 x_m + \beta_3 y_m + \beta_4 x_m y_m = v_m; \end{cases} \quad (1.6)$$

что аналогично в матричной форме записи

$$\begin{bmatrix} 1 & x_i & y_i & x_i y_i \\ 1 & x_j & y_j & x_j y_j \\ 1 & x_k & y_k & x_k y_k \\ 1 & x_m & y_m & x_m y_m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \alpha_i \\ \alpha_j \\ \alpha_k \\ \alpha_m \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} u_i \\ u_j \\ u_k \\ u_m \end{Bmatrix}; \quad (1.7)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & x_i & y_i & x_i y_i \\ 1 & x_j & y_j & x_j y_j \\ 1 & x_k & y_k & x_k y_k \\ 1 & x_m & y_m & x_m y_m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \beta_i \\ \beta_j \\ \beta_k \\ \beta_m \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} v_i \\ v_j \\ v_k \\ v_m \end{Bmatrix}. \quad (1.8)$$

Определяя из уравнений (1.7) и (1.8), неизвестные параметры $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ и $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ и внося их в выражения (1.1) и (1.2), получаем

$$u(x, y) = (\alpha_i + b_i x + c_i y + d_i xy)u_i + (\alpha_j + b_j x + c_j y + d_j xy)u_j + \dots + (\alpha_k + b_k x + c_k y + d_k xy)u_k + (\alpha_m + b_m x + c_m y + d_m xy)u_m; \quad (1.9)$$

$$v(x, y) = (\alpha_i + b_i x + c_i y + d_i xy)v_i + (\alpha_j + b_j x + c_j y + d_j xy)v_j + \dots + (\alpha_k + b_k x + c_k y + d_k xy)v_k + (\alpha_m + b_m x + c_m y + d_m xy)v_m; \quad (1.10)$$

или в матричной форме записи:

$$\begin{Bmatrix} u(x,y) \\ v(x,y) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_1 & 0 & \Phi_2 & 0 & \Phi_3 & 0 & \Phi_4 & 0 \\ 0 & \Phi_1 & 0 & \Phi_2 & 0 & \Phi_3 & 0 & \Phi_4 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ u_j \\ v_j \\ u_k \\ v_k \\ u_m \\ v_m \end{Bmatrix}, \quad (1.11)$$

где - функции формы элемента

(1.12)

$M_{p,q}$ - элементы следующей матрицы (p, q = 1, 2, 3, 4)

$$M = \begin{bmatrix} 1 & x_i & y_i & x_i & y_i \\ 1 & x_j & y_j & x_j & y_j \\ 1 & x_k & y_k & x_k & y_k \\ 1 & x_m & y_m & x_m & y_m \end{bmatrix}^{-1} \quad (1.13)$$

Матрица Коши принимает вид

$$B(x,y) = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_1 & 0 & \Phi_2 & 0 & \Phi_3 & 0 & \Phi_4 & 0 \\ 0 & \Phi_1 & 0 & \Phi_2 & 0 & \Phi_3 & 0 & \Phi_4 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial \Phi_1}{\partial x} & 0 & \frac{\partial \Phi_2}{\partial x} & 0 & \frac{\partial \Phi_3}{\partial x} & 0 & \frac{\partial \Phi_4}{\partial x} & 0 @ 0 & \frac{\partial \Phi_1}{\partial y} & 0 & \frac{\partial \Phi_2}{\partial y} & 0 & \frac{\partial \Phi_3}{\partial y} & 0 & \frac{\partial \Phi_4}{\partial y} @ \frac{\partial \Phi_1}{\partial y} & \frac{\partial \Phi_1}{\partial y} & \frac{\partial \Phi_1}{\partial x} \end{pmatrix}$$

Внутренняя энергия деформации элемента толщиной h

$$U = \frac{1}{2} \mathbf{h} \mathbf{u}^T \left(\iint_S \mathbf{B}^T \mathbf{A} \mathbf{B} dS \right) \mathbf{u}, \quad (4.15)$$

где интегрирование ведется по площади элемента.

Работа внешних сил по соответствующим узловым перемещениям равна

$$V = \mathbf{h} \mathbf{u}^T \mathbf{F}, \quad (4.16)$$

где $\mathbf{F}$ - вектор узловых сил

$$\mathbf{F} = \begin{Bmatrix} F_{xi} \\ F_{yi} \\ F_{xj} \\ F_{yj} \\ F_{xk} \\ F_{yk} \\ F_{xm} \\ F_{ym} \end{Bmatrix}. \quad (4.17)$$

Выражение принимает вид

$$, \quad (4.18)$$

что равносильно

$$Ku = F \quad (4.19)$$

где K - матрица жесткости элемента

$$K = \iint_S B^T A B dS \quad (4.20)$$

Блок-схема реализации математической модели представлена на рис. 7.

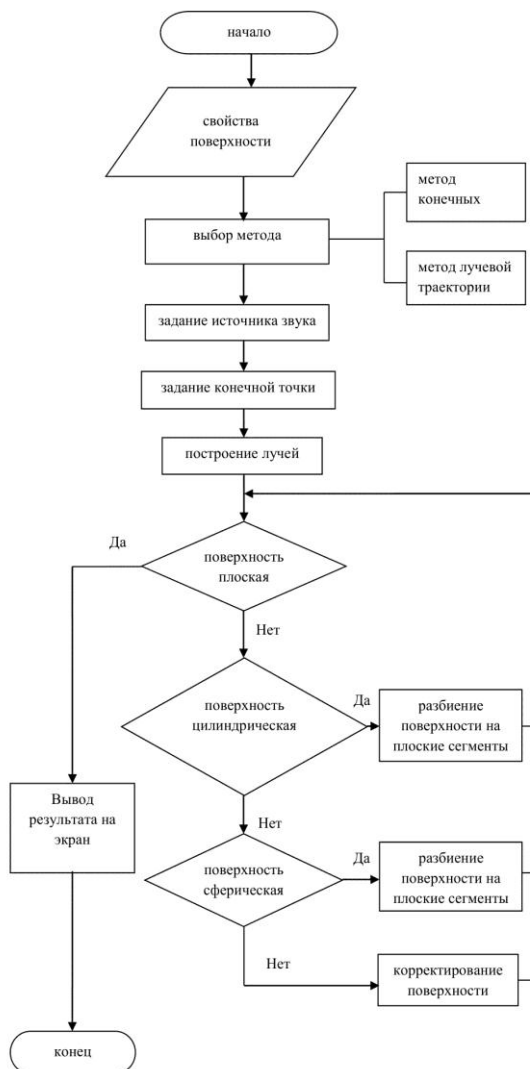


Рисунок 7– Блок-схема работы программы

Выводы: в данной работе исследована математическая модель распространения волн в акустических средах, обеспечивающая расчёт переотражений звуковых лучей и обладающая возможностями проведения экспериментов с помощью средств компьютерной графики, что в ряде случаев позволяет получать более точные результаты, чем в существующих системах акустического моделирования. Представленная в статье математическая модель стала основой для разработки программного приложения проектирования помещений с акустическими свойствами. В дальнейших исследованиях планируется развить модель с включением в расчёт свойств материалов для повышения качества проектирования.

Список использованной литературы: 1. Синько И.С., Молчан Е.Г. Акустические свойства промышленных помещений и зданий многоцелевого назначения [Текст] / Синько И.С. Проблемы техники. Наук.-вироб. журн. / Одес. нац. мор. ун-т, Хмельн. нац. ун-т. – Одеса, 2014. – №2. – С. 90–96. 2. Лебедев Б.В., Синько И.С. Автоматизированный расчет освещения помещений [Текст] / Б.В. Лебедев // Проблемы техники. Наук.-вироб. журн. / Одес. нац. мор. ун-т, Хмельн. нац. ун-т. – Одеса, 2011. – №2. – С. 64–69. 3. Тонконогий В.М., Синько И.С., Корнещук И.Т. Автоматизированное проектирование помещений со специальными акустическими свойствами [Текст] / В.М. Тонконогий // Високі технології в машинобудуванні. Збірник наукових праць. Харків НТУ "ХПІ" 2015 – №1. – С. 204–209. 4. Тонконогий В.М., Якимов А.А., Синько И.С. Компьютерная модель проектирования помещений с акустическими свойствами [Текст] / В.М. Тонконогий // Високі технології в машинобудуванні. Збірник наукових праць, Харків НТУ "ХПІ" 2016 – №1. – С. 111–117. 5. Автоматизоване проектування акустичних конструкцій [Текст] : матеріали тез доповідей VIII міжнародної науково-практичної конференції (м. Чернігів, 10 – 12 травня 2018 р.) : у 2-х т. / Чернігівський національний технологічний університет [та ін.] ; відп. за вип.: Єрошенко Андрій Михайлович [та ін.]. – Чернігів : ЧНТУ, 2018. – Т.2. — Чернігів : ЧНТУ, 2018. – 248 с. 6. Павленко И.В. Метод конечных элементов в задачах сопротивления материалов и линейной теории упругости [Текст] / Павленко И.В. Сумы: СумГУ 2006. – 148 с. 7. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике [Текст] / Зенкевич О. М.: Мир, 1984. – 101с. 8. Бреббия К., Телес Ж., Вробел Л. Методы граничных элементов [Текст] / Бреббия К. М.: Мир 1987. – 158с. 9. Бенерджи П., Баттерфилд Р. Методы граничных элементов в прикладных науках. [Текст] / Бенерджи П. М.: Мир, 1984. – 123с. 10. Уфимцев П.Я. Метод краевых волн в физической теории дифракции. [Текст] / Уфимцев П.Я. М.: Советское радио, 1962. – 243с.

Bibliography (transliterated): 1. Sinko I.S., Molchan E.G. Akusticheskie svojstva promyshlennyh pomeshenij i zdaniy mnogoceleвого naznacheniya [Текст] / Sinko I.S. Problemi tehniki. Nauk.-virob. zhurn. / Odes. nac. mor. un-t, Hmeln. nac. un-t. – Odesa, 2014. – №2. – S. 90–96. 2. Lebedev B.V., Sinko I.S. Avtomatizirovannyj raschet osvesheniya pomeshenij [Текст] / B.V. Lebedev // Problemi tehniki. Nauk.-virob. zhurn. / Odes. nac. mor. un-t, Hmeln. nac. un-t. – Odesa, 2011. – №2. – S. 64–69. 3. Tonkonogij V.M., Sinko I.S., Korneshuk I.T. Avtomatizirovannoe proektirovanie pomeshenij so specialnymi akusticheskimi svojstvami [Текст] / V.M. Tonkonogij // Visoki tehnologii v mashinobuduvanni. Zbirnik naukovih prac, Harkiv NTU "HPI" 2015 – №1. – S. 204–209. 4. Tonkonogij V.M., Yakimov A.A., Sinko I.S. Kompyuternaya model proektirovaniya pomeshenij s akusticheskimi svojstvami [Текст] / V.M. Tonkonogij // Visoki tehnologii v mashinobuduvanni. Zbirnik naukovih prac, Harkiv NTU "HPI" 2016 – №1. – S. 111–117. 5. Avtomatizovane proektuvannya akustichnih konstrukcij [Текст] : materiali tez dopovidej VIII mizhnarodnoyi nauково-praktichnoyi konferenciyi (m. Chernigiv, 10 – 12 travnya 2018 r.) : u 2-h t. / Chernigivskij nacionalnij tehnologichnij universitet [ta in.]; vidp. za vip.: Yeroshenko Andriy Mihajlovich [ta in.]. – Chernigiv : ChNTU, 2018. – T.2. — Chernigiv : ChNTU, 2018. – 248 s. 6. Pavlenko I.V. Metod konechnyh elementov v zadachah soprotivleniya materialov i lineinoj teorii uprugosti [Текст] / Pavlenko I.V. S. Sumy: SumGU 2006. – 148 s. 7. Zenkevich O. Metod konechnyh elementov v tekhnike [Текст] / Zenkevich O. M.: Mir, 1984. – 101s. 8. Brebbia K., Teles Zh., Vrobel L. Metody granichnyh elementov [Текст] / Brebbia K. M.: Mir 1987. – 158s. 9. Benerdzhii P., Batterfild R. Metody granichnyh elementov v prikladnyh naukah. [Текст] / Benerdzhii P. M.: Mir, 1984. – 123s. 10. Ufimcev P.Ya. Metod kraevykh voln v fizicheskoy teorii difrakcii. [Текст] / Ufimcev P.Ya. M.: Sovetskoe radio, 1962. – 243s.

Надійшла до редколегії 25.06.2018

УДК 536:621.9 (075.8)

Усов А.В., д-р техн. наук, Куницын М.В., аспирант, Одесса, Украина

ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЦИЛИНДРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Рассмотрены возможности повышения надёжности и долговечности цилиндрической группы технологическими методами, в том числе использование покрытий из износостойких материалов на рабочие поверхности цилиндров. Анализ причин образования сколов и трещин на обрабатываемых поверхностях указанных изделий показал, что появление этих дефектов связана с тепловыми процессами, которые сопровождают механическую обработку. Разработана аналитическая модель по определению термомеханического состояния рабочей поверхности цилиндра с износостойким покрытием. Проведено трибокоррозионные исследования композиционных материалов на основе Ni/Ni-TiO₂, полученных методом электрохимического осаждения.

Ключевые слова: эксплуатационные характеристики, трибокоррозия, износостойкость, отслоение, термомеханические процессы, шлифование, покрытие.

Розглянуто можливості підвищення надійності і довговічності циліндричної групи технологічними методами зокрема використання покриттів зі зносостійких матеріалів на робочі поверхні циліндрів. Аналіз причин утворення сколів та тріщин на оброблюваних поверхнях зазначених виробів показав, що поява цих дефектів пов'язана з тепловими процесами, які супроводжують механічну обробку. Розроблено аналітичну модель по визначенню термомеханічного стану робочої поверхні циліндра з зносостійким покриттям. Проведено трибокорозійне дослідження композиційних матеріалів на основі Ni/Ni-TiO₂, отриманих методом електрохімічного осадження.

Ключові слова: експлуатаційні характеристики, трибокорозія, зносостійкість, відшарування, термомеханічні процеси, шліфування, покриття.

The possibilities of increasing the reliability and durability of a cylindrical group by technological methods are considered, including the use of coatings from wear-resistant materials on the working surfaces of cylinders. An analysis of the reasons for the formation of chips and cracks on the surfaces of these products showed that the appearance of these defects is associated with the thermal processes that accompany the machining. An analytical model has been developed to determine the thermomechanical state of the working surface of a cylinder with a wear-resistant coating. Tribocorrosive studies of composite materials based on Ni/Ni-TiO₂ obtained by electrochemical deposition were carried out.

Keywords: reliability, durability, tribocorrosion, wear resistance, detachment, thermomechanical processes, diamond-abrasive processing.

Постановка проблемы

Анализ исследований по трибологии показал, что за полный жизненный цикл машин эксплуатационные расходы в несколько раз превышают затраты на изготовление новой техники. Потери средств от трения и износа в развитых государствах достигают 4...5% национального дохода [0].

Повышение долговечности машин непосредственно связано с износостойкостью деталей машин. Таким образом, повышение

износостойкости деталей машин является актуальным направлением исследований. Долговечность многих машин определяется износостойкостью деталей, имеющих внутренние цилиндрические поверхности, работающие в условиях трения скольжения.

Анализ последних исследований и публикаций

Известно, что задача повышения износостойкости конкретного изделия часто не предусматривает качественной модификации структурного состава используемого материала во всем его объёме, а переносится на видоизменение поверхностного слоя материала, поскольку защита сопрягаемых деталей от износа в ряде случаев решается поверхностным упрочнением. В общем случае под поверхностным упрочнением понимается повышение твёрдости рабочей поверхности детали, что позволяет увеличить износостойкость [0, 0].

Повышению механических характеристик трущихся поверхностей посвящено большое число работ, в результате которых предложены различные способы упрочнения. Перспективные направления развития поверхностно-упрочняющих технологий предполагают использование новых методов получения износостойких покрытий, в основном с использованием износостойких материалов, т.е. покрытий на основе соединений типа оксидов, нитридов и карбидов. Образование упрочняющих покрытий из разнородных материалов приводит не только к модификации поверхностного слоя, но и к образованию, в ряде случаев, принципиально нового композиционного материала поверхностного слоя, обладающего как высокой прочностью и достаточной пластичностью, так и повышенной износостойкостью [0 - 0].

Формулировка цели исследования

При поступательном движении поршня в цилиндре, имеющем некруглость δ на его рабочей поверхности формируются зоны частичного отслоения покрытия. Эти участки под действием рабочих касательных напряжений могут достигать таких значений, при которых происходит отслаивание покрытия от матрицы цилиндрической поверхности. Изготовление цилиндров с нанесением на их рабочие поверхности износостойких покрытий связано с технологическими операциями по их обработке, которые сопровождаются термомеханическими явлениями.

Поэтому целью исследования являются термомеханические процессы в изделиях с покрытием при их обработке и эксплуатации для определения условий образования дефектов отслоения покрытий от основного материала и их устранения с учётом физико-механического состояния поверхностного слоя, технологических параметров финишной обработки и наследственных дефектов.

Изложение основного материала исследования

Найдём, при каких технологических параметрах, связанных с

шероховатостью рабочей поверхности цилиндра и его геометрической погрешностью, а также физико-механических свойств покрытия и материала цилиндра, происходит разрушение собственно покрытия.

Расчётная схема по определению напряженно-деформированного состояния системы цилиндр-покрытие следующая (Рис. 1.).

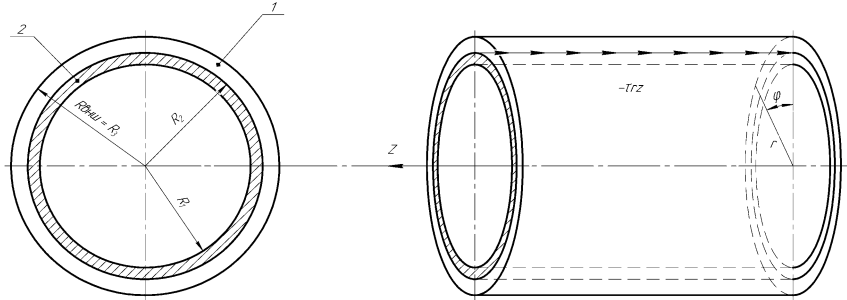


Рисунок 1. Расчётная схема: 1 – тело цилиндра; 2 – тело покрытия

Рассмотрим уравнение теплопроводности для двухслойного цилиндра при симметричном нагревании, со свободным теплообменом с внутренней и внешней поверхности цилиндра. Температура и тепловой поток окрестности границы раздела изменяется непрерывным образом. Иными словами, получаем следующую задачу: найти непрерывную функцию температуры $t_i(r, \tau)$ в области $D[R_1 \leq r \leq R_2, 0 \leq \tau < \infty]$, удовлетворяющую уравнению $[0, 0, 0]$:

$$\frac{\partial t_i}{\partial \tau} = a_i \left(\frac{\partial^2 t_i}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t_i}{\partial r} \right), \quad (1)$$

где $i = 1$ для первой области $D[R_1 \leq r \leq R_2, 0 \leq \tau < \infty]$

$i = 2$ для второй области $D[R_1 \leq r \leq R_2, 0 \leq \tau < \infty]$

граничным условиям:

$$\begin{aligned} \frac{\partial t_1}{\partial r} - h_1[t_1 - T_1(\tau)] &= 0, \text{ при } r = R_1, \\ \frac{\partial t_2}{\partial r} - h_2[t_2 - T_2(\tau)] &= 0, \text{ при } r = R_2; \end{aligned} \quad (2)$$

условиям сопряжения:

$$t_1 = t_2, \lambda_1 \frac{\partial t_1}{\partial r} = \lambda_2 \frac{\partial t_2}{\partial r}, \text{ при } r = R_2; \quad (3)$$

начальному условию:

$$t_i(r, 0) = \Phi_i. \quad (4)$$

Здесь a_i, h_i, λ_i — коэффициенты температуропроводности,

относительной теплоотдачи и теплопроводности, соответственно покрытия ($i=2$) и основного материала ($i=1$).

Функции $(\Phi_i) \bar{r}, (T_i) \bar{\tau}$ удовлетворяют таким условиям:

а) $T_i(\tau)$ — дифференцируемая по τ функция.

Кроме того

$$\int_0^{\tau} \int_{R_i}^{R_{i+1}} \frac{\partial T_i}{\partial \tau} \left[A I_0 \left(\gamma_n \frac{r}{\sqrt{\alpha_i}} \right) + B N_0 \left(\gamma_n \frac{r}{\sqrt{\alpha_i}} \right) \right] \exp[-\gamma_n^2(\tau - \bar{\tau})] dr d\bar{\tau} < \infty$$

б) $\Phi_i(r)$ — непрерывная по r функция, производная которой может иметь разрыв первого рода при $r = R_2$.

Решение задачи будем искать в виде

$$t_i = [T_2(\tau) - T_1(\tau)](A_i \ln r + B_i) + T_i(\tau) + \Theta_i(r, \tau) \quad (5)$$

Получаемая для Θ_i задача решается методом конечных интегральных преобразований, ядра $u_{in}(r)$ которых удовлетворяют уравнению Бесселя

$$u_{in}'' + \frac{1}{r} u_{in}' + \frac{\gamma_n^2}{\alpha_i} u_{in} = 0, \quad (6)$$

с граничными условиями

$$\begin{aligned} u_{in}' - h_1 u_{in} &= 0 \text{ при } r = R_1, \\ u_{1n} &= u_{2n}, \gamma_1 u_{1n} = \gamma_2 u_{2n} \text{ при } r = R_2; \\ u_{2n} + h_2 u_{2n} &\text{ при } r = R_3; \end{aligned} \quad (7)$$

Окончательное решение задачи запишется как

$$t_i(r, \tau) = \psi_i(r, \tau) + \sum_{n=1}^{\infty} \exp(-\gamma_n^2 \tau) \left[\Theta_n(0) + \int_0^{\tau} \frac{d\psi_n(\bar{\tau})}{d\bar{\tau}} \exp(-\gamma_n^2 \bar{\tau}) d\bar{\tau} \right] u_{in}(r).$$

Здесь $\psi_i(r, \tau) = [T_2(\tau) - T_1(\tau)](A_i \ln r + B_i) + T_i(\tau)$.

Для определения напряжённо-деформированного состояния цилиндра с покрытием, подверженного действию температурного поля, рассмотрим следующую задачу. Двухслойный неограниченный полый цилиндр подвержен действию температурного поля $t_i = t_i(r, \tau)$. Материал цилиндра и покрытие соприкасаются по всей поверхности раздела и, следовательно, перемещения на поверхности раздела будут непрерывными. Другое условие на границе раздела получаем из условия непрерывности нормальных напряжений σ_r . На внешних поверхностях σ_r полагаются равными нулю. Таким образом имеем следующую задачу: найти непрерывную функцию деформации $u_i(r, \tau)$ в области $D[R_1 \leq r \leq R_2, 0 \leq \tau \leq \tau_0]$, удовлетворяющую уравнению

$$\frac{1}{c_i^2} \frac{\partial^2 u_i}{\partial \tau^2} = \frac{\partial^2 u_i}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_i}{\partial r} - \frac{u_i}{r^2} - m_i \frac{\partial t_i}{\partial \tau} \quad (8)$$

где $i=1$ для первой области, то есть когда r изменяется от R_1 до R_2 и $i=2$ для второй области, когда r изменяется от R_2 до R_3 ; $u_i(r, \tau)$ — перемещение, c_i — скорость распространения волн расширения в упругой среде; граничным условиям

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_1}{\partial r} + p_1 u_1 &= m_1 t_1, \text{ при } r = R_1, \\ \frac{\partial u_2}{\partial r} + p_2 u_2 &= m_2 t_2, \text{ при } r = R_3; \end{aligned} \quad (9)$$

условиям сопряжения:

$$u_1 = u_2, p_{12} \frac{\partial u_1}{\partial r} + q_{12} u_1 = \frac{\partial u_2}{\partial r} + p_{12} m_1 t_1 - m_2 t_2 \text{ при } r = R_2; \quad (10)$$

начальным условиям:

$$u_i(r, 0) = \phi_i(r), \frac{\partial u_i(r, 0)}{\partial \tau} = \psi_i(r). \quad (11)$$

Решение этой задачи будем искать в виде:

$$u_i(r, \tau) = \psi_i(r, \tau) + \theta_i(r, \tau), \quad (12)$$

здесь

$$\psi_i(r, \tau) = A_i(\tau)r + \frac{B_i(\tau)}{r} + \frac{m_i}{r} \int_{R_i}^r t_i(\rho, \tau) \rho d\rho \quad (13)$$

квазистатическое решение задачи (8) – (11). $A_i(\tau)$ и $B_i(\tau)$ — некоторые функции, которые выбираются так, чтобы для функции $\theta_i(r, \tau)$ получились однородные граничные условия. Полученная для θ_i задача решается методом конечных интегральных преобразований.

Соответствующие формулы обращения имеют вид

$$\Theta_n = \frac{p_{12}}{c_1^2} \int_{R_1}^{R_2} \Theta_1 \omega_{1n} r dr + \frac{1}{c_2^2} \int_{R_2}^{R_3} \Theta_2 \omega_{2n} r dr, \quad (14)$$

$$\Theta_i = \sum_{n=1}^{\infty} \Theta_n \omega_{in} (R_i \leq r \leq R_{i+1}). \quad (15)$$

Здесь $\omega_{in}(r)$ решение уравнения Бесселя

$$\omega_{in}'' + \frac{1}{r} \omega_{in}' + \left(\frac{\gamma_n^2}{c_i^2} - \frac{1}{r^2} \right) \omega_{in} = 0, \quad (16)$$

с граничными условиями

$$\begin{aligned} \omega_{1n}' + p_1 \omega_{1n} &= 0 \text{ при } r = R_1, \\ \omega_{1n} = \omega_{2n}, p_{12} \omega_{1n}' + q_{12} \omega_{1n} &= \omega_{2n}' \text{ при } r = R_2, \\ \omega_{2n}' + p_2 \omega_{2n} &= 0 \text{ при } r = R_3. \end{aligned} \quad (17)$$

Для определения ϑ_n имеем уравнение

$$\frac{d^2 \vartheta_n}{d\tau^2} + \gamma_n^2 \vartheta_n = -\frac{d^2 \bar{\psi}_n}{d\tau^2}, \quad (18)$$

с начальными условиями:

$$\vartheta_n = \bar{\varphi}_n - \bar{\psi}_n, \quad \frac{d\vartheta_n}{d\tau} = \bar{\varphi}_n' - \frac{d\bar{\psi}_n}{d\tau} \text{ при } \tau = 0. \quad (19)$$

Решение уравнения (18) с начальными условиями (19) запишется так

$$\vartheta_n = c_{1n} \cos \gamma_n \tau + c_{2n} \sin \gamma_n \tau - \frac{1}{\gamma_n} \int_0^\tau \frac{d^2 \bar{\psi}_n}{d\tau^2} \sin[\gamma_n(\tau - \bar{\tau})] d\bar{\tau}, \quad (20)$$

где

$$c_{1n} = \bar{\varphi}_n(0) - \bar{\psi}_n(0), \quad c_{2n} = \frac{1}{\gamma_n} \left[\bar{\varphi}_n'(0) - \frac{d\bar{\psi}_n(0)}{d\tau} \right].$$

Анализ расчётных зависимостей свидетельствует о том, что с увеличением шероховатости рабочей зоны цилиндра увеличивается зона отслоения покрытия от волокна в связи с трением на этом участке с поверхностью поршня.

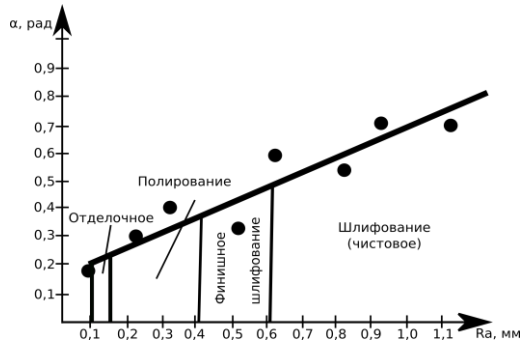


Рисунок 2. Влияние режимов обработки цилиндрической группы с покрытием на её характеристики

А это значит, что разрушение покрытия произойдёт в том случае, когда технологические напряжения по величине будут превосходить прочность сцепления $\sigma_{сц}$.

На рис. 2 представлен режим обработки рабочих поверхностей цилиндра, которые обеспечивают необходимую шероховатость для сохранения функциональных свойств группы поршень-цилиндр с покрытием [0 - 0].

Результаты

Для обеспечения требуемой надёжности и долговечности

цилиндрической группы с покрытием необходимо при нанесении покрытий на их рабочих поверхностях обеспечить шероховатость $0,8 \leq R_a \leq 1,2$. Такую шероховатость можно достичь за счёт операций финишного шлифования и последующего отделочного полирования.

Разработка технологических критериев для управления процессом бездефектного шлифования осуществлена на базе установленных функциональных связей между физико-механическими свойствами обрабатываемых материалов цилиндрической группы и покрытий и основными технологическими параметрами.

Качество обрабатываемых поверхностей цилиндрической группы будет обеспечено, если с помощью управляющих технологических параметров подобрать такие режимы обработки, смазочно-охлаждающие среды и характеристики инструмента, что текущие значения температуры шлифования $T_i(r, \tau)$ и теплового потока $q(r, \tau)$, напряжений $\sigma(r, \tau)$ не будут превосходить своих предельных значений [0].

Реализация системы ограничивающих неравенств по величинам самой температуры и глубине её распространения в виде:

$$T(r, \tau) = \frac{C}{2\pi\lambda} \sum_{k=0}^n H\left(\tau - \frac{kl}{v_{kp}}\right) H\left(\frac{L+kl}{v_{kp}}\right) \int_{\tau_1}^{\tau_2} f(r, \tau, \tau') d\tau' \leq [T]_M \quad (21)$$

$$T(R_2, \tau) = \frac{C}{2\pi\lambda} \sum_{k=0}^n H\left(\tau - \frac{kl}{v_{kp}}\right) H\left(\frac{L+kl}{v_{kp}}\right) \int_{\tau_1}^{\tau_2} \psi(r_b, \tau, \tau') d\tau' \leq [T]_{c.n.} \quad (22)$$

$$T_k(r, \tau) = \frac{C v_{kp}}{\pi \lambda L \sqrt{v_g}} \int_0^\tau \int_{-\theta}^\theta \frac{\chi(\eta, t) \vartheta^{\frac{(r-\eta)^2}{4(\tau-t)}}}{2\sqrt{\pi(\tau-t)}} \left\{ \frac{1}{\sqrt{\pi(\tau-1)}} + \right. \\ \left. + \gamma \vartheta^{v^2(\tau-t)} [1 + \Phi(r\sqrt{\tau-t})] \right\} d\eta dt \leq [T] \quad (23)$$

$$T_k^{max}(r, 0) = \frac{C v_{kp} \alpha}{\lambda r v_q^2} \sqrt{\frac{\alpha}{\pi}} \left[1 - \exp\left(-\frac{v_q \sqrt{Dt_{шл}}}{\alpha}\right) \right] \leq [T] \cdot |_{R_1, 0 \leq \tau \leq R_1} \quad (24)$$

позволяет избежать образования шлифовочных прижогов и может послужить основой для проектирования циклов шлифования по тепловому критерию.

Обработку материалов и сплавов без шлифовочных трещин можно обеспечить, если ограничить формирующиеся в зоне интенсивного охлаждения напряжения предельными значениями:

$$\sigma_{max}(r, \tau) \cdot |_{r=R_1} = 2G \frac{1+\nu}{1-\nu} \alpha_r T_k \exp\left(-\frac{r}{2\sqrt{\alpha\tau}}\right) \leq [\sigma_{cu}] \quad (25)$$

Для подтверждения адекватности аналитической модели были проведены трибокоррозионные исследования композиционных материалов на основе Ni/Ni-TiO₂, полученные методом электрохимического осаждения (рис. 3) [9].

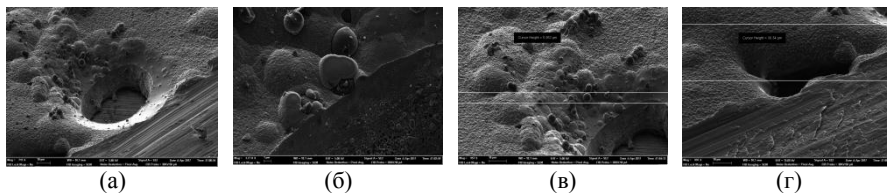


Рисунок 3. Исследование композиционных материалов на основе Ni/Ni-TiO₂ в сканирующем электронном микроскопе: (а) нарушение покрытия, (б) частицы TiO₂, (в) измерение диаметра частицы, (г) измерение толщины покрытия

После проведения трибокоррозионных исследований материалов Ni/Ni-TiO₂ определено, что для покрытия Ni заметно увеличение глубины и ширины трещин в зависимости от увеличения нагрузки при неизменном времени воздействия. При этом профиль трещин для покрытия Ni-TiO₂ с увеличением нагрузки не меняется. В связи с этим можно выделить положительное влияние частиц TiO₂ в покрытии, которые увеличивают защитные функции покрытия от механического истирания, при этом величина нагрузки для Ni-TiO₂ перестаёт играть столь существенную роль.

Выводы

Разработана аналитическая модель по определению термомеханического состояния рабочей поверхности цилиндра с износостойким покрытием, позволяющая осуществить рациональный выбор технологических параметров обработки этих изделий по приведённым критериям для обеспечения бездефектной обработки. Адекватность полученной модели проверялась экспериментальными исследованиями композиционных материалов на основе Ni/Ni-TiO₂ полученные методом электрохимического осаждения.

Список использованной литературы: 1. Гаркунов Д. Н., Корник П. И. Виды трения и износа. Эксплуатационные повреждения деталей машин : монография. Москва : Издательство МСХА, 2003. 343 с. 2. Ueda T., Hosokawa A., Yamamoto A. Measurement of grinding temperature using infrared radiation pyrometer with optical fiber. Journal of Engineering for Industry. 1986. Т. 108. №. 4. Р. 247–251. 3. Усов А. В., Батырев А. А. Математическое моделирование процессов контроля покрытий элементов конструкций на базе сингулярных интегральных уравнений. Проблемы машиностроения. 2010. Т. 13, № 1. С. 65–75. 4. Оборский Г. А., Дашченко А. Ф., Усов А. В., Дмитришин Д. В. Моделирование систем : монография. Одесса : Астропринт, 2013. 664 с. 5. Балохонов Р. Р. Поверхностные слои и внутренние границы раздела в гетерогенных материалах : монография / отв. ред. В. Е. Панин. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2006. 520 с. 6. Якимов А. В., Слободяник П. Т., Усов А. В. Теплофизика механической обработки. К. Одесса : Лыбидь. 1991. 240 с. 7. Carslaw H. S. Introduction to the mathematical theory of the conduction of heat in solids (Classic Reprint). United Kingdom, London: Fb&c Limited, 2017. 284 p. 8. Carslaw H. S., Jaeger J. C. Conduction of heat in solids. United Kingdom, Oxford : Clarendon Press, 1986. 510 p. 9. Паркус Г. Неустановившиеся температурные напряжения / пер. с нем. под ред. Г. С. Шапиро. Москва: Физматлит. 1963. 252 с. 10. Попов Г. Я. Концентрация упругих напряжений возле штампов разрезов тонких включений и подкреплений. Москва : Наука, 1982. 344 с. 11. Градштейн И. С., Рыжик И. М. Таблицы интегралов, рядов и произведений : монография. 7-е изд., пер. с англ. / науч. ред.: Алан Джеффри, Даниэль Цвиллингер. Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2011. 1232 с. 12. Сторожев В. П. Причины и закономерности постепенных отказов основных

триботехнических объектов энергетической системы судна и повышение их ресурса. Одесса : Сторозhev В.П. 2001. 341 с. 13. Sun Y., Flis-Kabulska I., Flis J. Corrosion behaviour of sediment electro-codeposited Ni–Al₂O₃ composite coatings. Materials Chemistry and Physics. 2014. T. 145. №. 3. P. 476–483. 14. Aruna S. T., Grips V. K. W., Rajam K. S. Ni-based electrodeposited composite coating exhibiting improved microhardness, corrosion and wear resistance properties. Journal of Alloys and Compounds. 2009. T. 468. №. 1–2. P. 546–552. 15. Chen L., Wang L., Zeng Z., Xu T. Influence of pulse frequency on the microstructure and wear resistance of electrodeposited Ni–Al₂O₃ composite coatings. Surface and Coatings Technology. 2006. T. 201. №. 3–4. P. 599–605. 16. Kim K. T., Kim D. W., Kim S. H., Kim C. K., Choi Y. J. Synthesis and improved explosion behaviors of aluminum powders coated with nano-sized nickel film. Applied Surface Science. 2017. T. 415. P. 104–108. 17. Kalpakjian S., Schmid S. R. Manufacturing engineering and technology. Upper Saddle River, NJ, USA : Pearson, 2014. 913 p. 18. Левченко А. А. Влияние технологической наследственности при производстве запасных частей на наводораживание деталей и их износостойкость. Проблемы техники. 2006. №2. С. 23–28. 19. Kunitsyn M. V., Usov A. V. Tribocorrosion research of Ni–Al₂O₃/TiO₂ composite materials obtained by the method of electrochemical deposition. Сучасні технології в машинобудуванні. Харків, 2017. вип. 12. С. 61–70.

Bibliography (transliterated): 1. Garkunov D. N., Kornik P. I. Vidy treniya i iznosa. Ekspluatatsionnye povrezhdeniya detalей машин : monografiya. Moskva : Izdatelstvo MSHA, 2003. 343 с. 2. Ueda T., Hosokawa A., Yamamoto A. Measurement of grinding temperature using infrared radiation pyrometer with optical fiber. Journal of Engineering for Industry. 1986. T. 108. №. 4. P. 247–251. 3. Usov A. V., Batyrev A. A. Matematicheskoe modelirovanie processov kontrolya pokrytij elementov konstrukcij na baze singulyarnykh integralnykh uravnenij. Problemy mashinostreniya. 2010. T. 13, № 1. S. 65–75. 4. Oborskiy G. A., Dashenko A. F., Usov A. V., Dmitrishin D. V. Modelirovanie sistem : monografiya. Odessa : Astropoint, 2013. 664 с. 5. Balohonov R. R. Poverhnostnye sloi i vnutrennie granicy razdela v geterogennykh materialah : monografiya / otv. red. V. E. Panin. Novosibirsk : Izd-vo SO RAN, 2006. 520 с. 6. Yakimov A. V., Slobodyanik P. T., Usov A. V. Teplofizika mekhanicheskoy obrabotki. K. Odessa : Lybid. 1991. 240 s. 7. Carslaw H. S. Introduction to the mathematical theory of the conduction of heat in solids (Classic Reprint). United Kingdom, London: Fb&c Limited. 2017. 284 p. 8. Carslaw H. S., Jaeger J. C. Conduction of heat in solids. United Kingdom, Oxford : Clarendon Press. 1986. 510 p. 9. Parkus G. Neustanovivshiesya temperaturnye napryazheniya / per. s nem. pod red. G. S. Shapiro. Moskva: Fizmatlit. 1963. 252 s. 10. Popov G. Ya. Koncentraciya uprugih napryazhenij vogle shtampov razrezov tonkikh vklucheniij i podkrepleniij. Moskva : Nauka, 1982. 344 s. 11. Gradshteyn I. S., Ryzhik I. M. Tablicy integralov, ryadov i proizvedenij : monografiya. 7-e izd., per. s angl. / nauch. red.: Alan Dzheffri, Daniel Cvillinger. Sankt-Peterburg : BHV-Peterburg, 2011. 1232 s. 12. Storozhev V. P. Prichiny i zakonomernosti postepennykh otkazov osnovnykh tribotekhnicheskikh obektov energeticheskoy sistemy sudna i povyshenie ih resursa. Odessa : Storozhev V.P. 2001. 341 s. 13. Sun Y., Flis-Kabulska I., Flis J. Corrosion behaviour of sediment electro-codeposited Ni–Al₂O₃ composite coatings. Materials Chemistry and Physics. 2014. T. 145. №. 3. P. 476–483. 14. Aruna S. T., Grips V. K. W., Rajam K. S. Ni-based electrodeposited composite coating exhibiting improved microhardness, corrosion and wear resistance properties. Journal of Alloys and Compounds. 2009. T. 468. №. 1–2. P. 546–552. 15. Chen L., Wang L., Zeng Z., Xu T. Influence of pulse frequency on the microstructure and wear resistance of electrodeposited Ni–Al₂O₃ composite coatings. Surface and Coatings Technology. 2006. T. 201. №. 3–4. P. 599–605. 16. Kim K. T., Kim D. W., Kim S. H., Kim C. K., Choi Y. J. Synthesis and improved explosion behaviors of aluminum powders coated with nano-sized nickel film. Applied Surface Science. 2017. T. 415. P. 104–108. 17. Kalpakjian S., Schmid S. R. Manufacturing engineering and technology. Upper Saddle River, NJ, USA : Pearson, 2014. 913 p. 18. Levchenko A. A. Vliyanie tehnologicheskoy nasledstvennosti pri proizvodstve zapasnykh chastej na navodoraживание деталей i ih iznosostojkost. Problemy tekhniki. 2006. №2. S. 23–28. 19. Kunitsyn M. V., Usov A. V. Tribocorrosion research of Ni–Al₂O₃/TiO₂ composite materials obtained by the method of electrochemical deposition. Suchasni tehnologiyi v mashinobuduvanni. Harkiv, 2017. vip. 12. S. 61–70.

Надійшла до редколегії 25.07.2018

УДК 621.923

В.А. Федорович, д-р техн. наук, Е.В. Островерх, канд. техн. наук,
Н.В. Козакова, канд. техн. наук, Харьков, Украина

МЕТОДОЛОГИЯ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА АЛМАЗНОГО ВЫГЛАЖИВАНИЯ

Наведено результати комп'ютерного динамічного моделювання процесу алмазного виглажування методом кінцевих елементів у програмному пакеті Third Wave AdvantEdge. Встановлено вплив модуля пружності оброблювального матеріала, радіуса виглажувача, глибини й швидкості виглажування на величину напруг у зоні обробки

Ключові слова: алмазне виглажування, комп'ютерне моделювання процесу обробки, пластична деформація, модуль пружності, режими виглажування

Приведены результаты компьютерного динамического моделирования процесса алмазного выглаживания методом конечных элементов в программном пакете Third Wave AdvantEdge. Установлено влияние модуля упругости обрабатываемого материала, радиуса выглаживателя, глубины и скорости выглаживания на величину напряжений в зоне обработки

Ключевые слова: алмазное выглаживание, компьютерное моделирование процесса обработки, пластическая деформация, модуль упругости, режимы выглаживания

The results of the computer simulation of the process of diamond smoothing by the finite element method in the software package Third Wave AdvantEdge are presented. The effect of the modulus of elasticity of the processed material, the radius of the smoother, the depth and the speed of smoothing on the value of stresses in the treatment zone is established

Keywords: diamond smoothing, computer simulation of the processing process, plastic deformation, modulus of elasticity, smoothing modes

Современные тенденции создания наукоемкой продукции характеризуются широким применением компьютерных математических приложений, главным преимуществом использования которых является существенное сокращение объема экспериментальных исследований при подготовке и планировании производства новой продукции. Развитие вычислительной техники открывает перспективы разработки трехмерной методологии комплексного исследования технологических процессов обработки деталей машин с целью повышения их эффективности и улучшения эксплуатационных свойств изготавливаемой продукции. Создание методологии трехмерного компьютерного моделирования процессов обработки, в том числе и методом алмазного выглаживания, позволяет повысить их стабильность и эффективность, добиться повышения стойкости инструмента и качества продукции, определить оптимальные параметры технологических операций [1].

Идеология компьютерного моделирования процесса алмазного выглаживания включает несколько элементов:

- исследование влияния механических свойств обрабатываемого материала, в частности, модуля упругости, на эффективность и стабильность процесса;

- определение оптимальных режимов процесса для получения необходимых остаточных сжимающих напряжений в поверхностном слое детали;

- определение оптимальной геометрии инструмента для различных материалов;

- определение условий, исключающих возможность повышенного износа или разрушения алмазного шлифователя вследствие превышения допустимых температур и эквивалентных напряжений;

Решение поставленных задач экспериментальным путем является чрезвычайно трудоемким и дорогостоящим процессом, поэтому компьютерное моделирование в сочетании с планированием модельных экспериментов процесса алмазного шлифования позволяют максимально быстро осуществлять его оптимизацию.

С этой целью использовался специализированный программный комплекс Third Wave Advantedge, основанный на методе конечных элементов и позволяющий моделировать процессы механической обработки в динамике в 2D и 3D пространстве. [2]. Возможность рассчитывать температуры и силы, которые действуют в системе инструмент–заготовка, эквивалентные напряжения в процессе обработки, пластические деформации, остаточные напряжения и др., загружать в программу, кроме стандартных инструмента и заготовок, собственные CAD-модели, траектории и параметры их движения, выбирать их материалы из большого каталога программы или создавать самостоятельно, задавать начальные условия, а также учитывать влияние СОТС, позволяет расширить охват технологических процессов и использовать Third Wave Advantedge для моделирования процесса алмазного шлифования. Введение в построенную модель физико-механических свойств обрабатываемого и инструментального материалов, режимов обработки, позволило рассчитать эквивалентные и остаточные напряжения, энергию деформации, плотность энергии деформации, главные напряжения, силы и температуру в зоне пластической деформации при шлифовании. Пакет позволяет исследовать как одиночное, так и комплексное влияние параметров на результат обработки. Решение данных задач в Third Wave AdvantEdge осуществлялось по следующему алгоритму.

1. Построение геометрической модели, при котором используемые элементы ранжируются по возрастанию приоритетов: $pt \rightarrow cr \rightarrow sf \rightarrow vl$ (точка $\rightarrow$ линия $\rightarrow$ поверхность $\rightarrow$ объем). При алмазном шлифовании с использованием элементов sf создавалась двухмерная модель системы «алмазная головка шлифователя–заготовка», выполненная в сечении плоскостью, заданной вектором движения и осью инструмента (рис. 1).

2. Задание свойств материалов для каждого элемента системы происходило с использованием стандартной базы данных. В качестве свойств материалов использовались модуль упругости, коэффициент Пуассона, массовая плотность, коэффициент термического расширения, теплопроводность, удельная теплоемкость и др.

3. Разбиение построенной модели на конечные элементы: на базе геометрической модели, состоящей из точек, линий, поверхностей и объемов (pt , cr , sf , vl), создается модель, состоящая из узлов (nd) и элементов (el) (рис. 2). Также задавались параметры динамического изменения сетки конечных элементов: в зоне деформации создавалась сеть, элементы которой значительно уменьшены. В процессе пластической деформации сетка конечных элементов становилась еще более мелкодисперсной (размер элементов менее 1 мкм) в соответствии с заданным коэффициентом уменьшения. В зоне отсутствия деформаций элементы сетки росли для ускорения процесса расчетов [3].

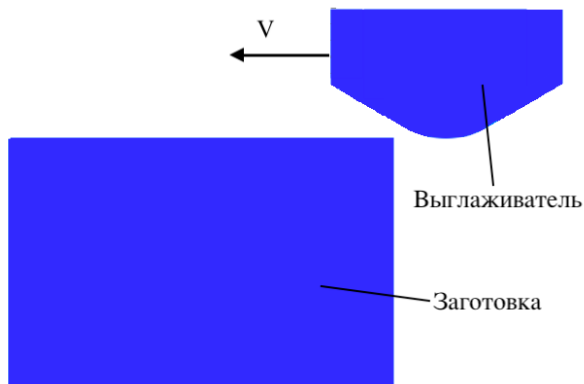


Рисунок 1 – Двухмерная модель системы «выглаживатель–заготовка»

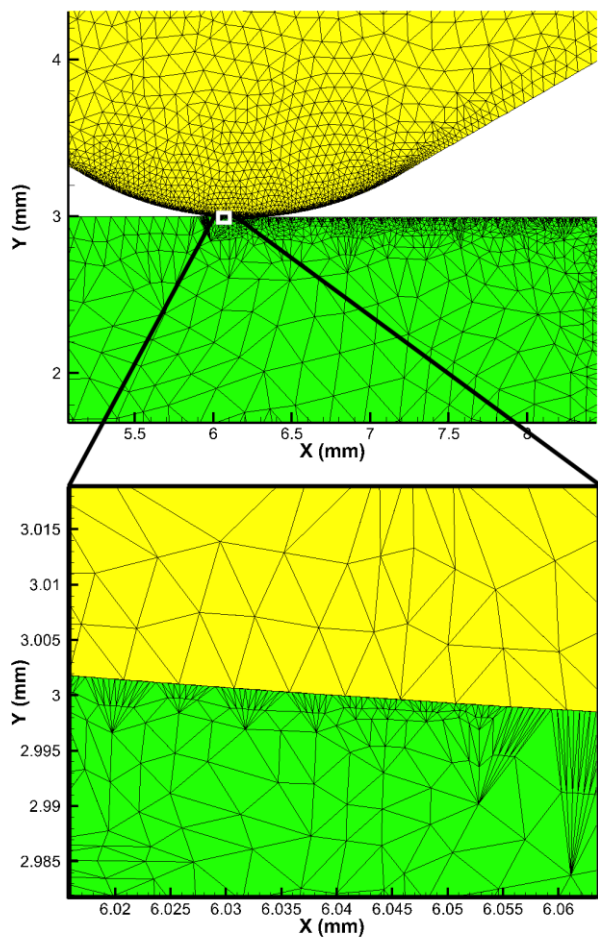


Рисунок 2 – Разбиение исходной модели на конечные элементы

4. Закрепление модели из конечных элементов производилось в узлах (рис. 3 а) и задание движения выплаживателя (рис. 3 б).

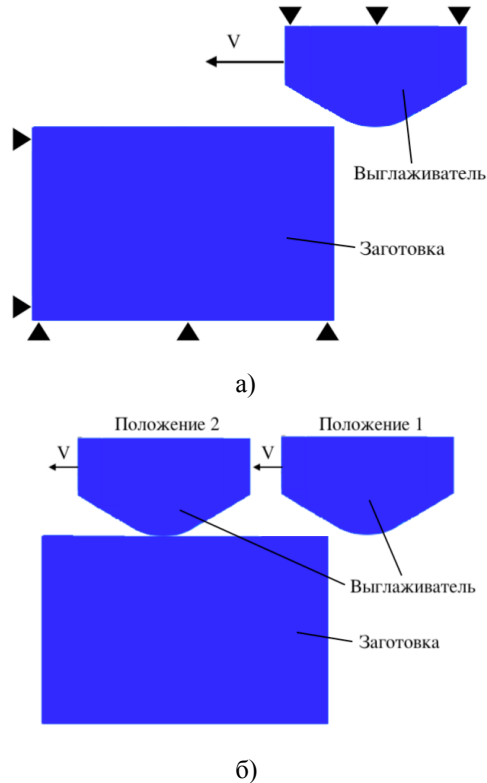


Рисунок 3 – Схематичное представление: закрепления модели (а) и задания движения выглаживателя (б)

Так как процесс выглаживания представляет собой сложную динамическую систему, в которой на результат влияет множество параметров [4], для экспериментального исследования процесса алмазного выглаживания в программном пакете Third Wave Advantedge использовался многофакторный эксперимент по плану В4 [5]. В качестве наиболее значимых параметров были выбраны четыре основных:

- модуль упругости обрабатываемого материала;
- скорость выглаживания;
- глубина выглаживания;
- радиус рабочей поверхности выглаживателя.

При подготовке имитационного моделирования в Third Wave Advantedge глубина и скорость выглаживания задавались в меню технологических параметров процесса. Значения необходимых физико-механических свойств,

соответствующие реальным обрабатываемым алмазным выглаживанием материалам, выбирались из встроенной в программный пакет библиотеки.

Основной задачей обработки результатов моделирования было изучение распределения эквивалентных напряжений в поверхностном слое обрабатываемой детали, от значений и распределения которых зависит результат, получаемый при выглаживании – пластическое деформирование и упрочнение выглаживаемой поверхности, а также распределение в ней остаточных сжимающих напряжений. Данные показатели значительно улучшают такие эксплуатационные свойства готовой детали как износостойкость, сопротивление усталости, надежность, ресурс и качество поверхности готовой детали [6].

В ходе имитационного моделирования было выявлено значительное отличие в распределении эквивалентных напряжений в зависимости от модуля упругости обрабатываемого материала, чье влияние оказалось наиболее значительным по сравнению с остальными исследуемыми факторами (рис. 4).

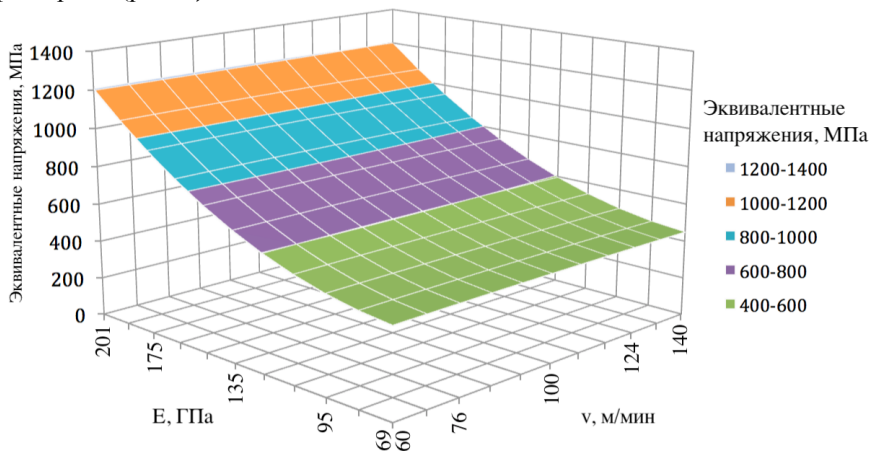


Рисунок 4 – Эквивалентные напряжения в поверхностном слое обрабатываемой детали в зависимости от модуля упругости обрабатываемого материала E и скорости выглаживания v

При уменьшении модуля упругости обрабатываемого материала происходит значительный спад эквивалентных напряжений в поверхностном слое обрабатываемой детали. При его увеличении обрабатываемый материал оказывает большее сопротивление деформации при поверхностном пластическом деформировании, что приводит к значительному увеличению эквивалентных напряжений как в поверхностном слое обрабатываемой детали, так и в материале инструмента. Увеличение эквивалентных

напряжений в поверхностном слое приводит к усилению его напряженно-деформированного состояния, от которого напрямую зависит упрочнение поверхности детали [7]. Таким образом, материалы, имеющие больший модуль упругости, имеют лучшие показатели упрочнения поверхностного слоя при обработке методом алмазного выглаживания.

Изменение проекций силы выглаживания показали, что составляющая силы в направлении, противоположном направлению скорости, для всех трех значений модуля упругости неизменно составляет в 50–60 Н. В то же время, сила, действующая в осевом направлении инструмента, существенно растет вместе с ростом модуля упругости обрабатываемого материала (рис. 5).

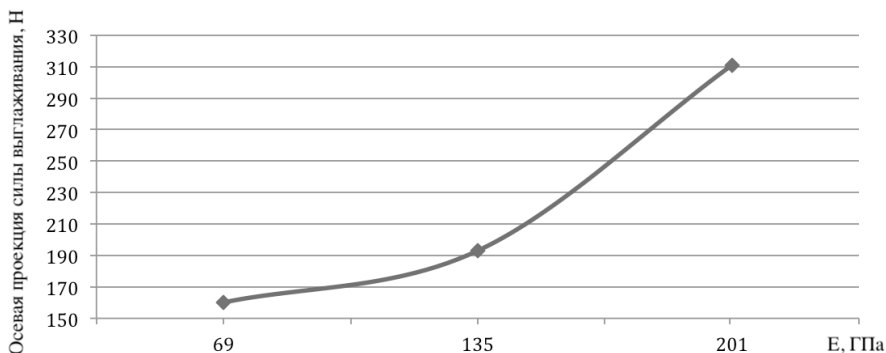


Рисунок 5 – Зависимость осевой проекции силы выглаживания от модуля упругости E обрабатываемого материала: 1) $E = 69$ ГПа – алюминиевый сплав EN AW 2024-T4;
2) $E = 135$ ГПа – никель-алюминиевая бронза C95500 (CuAl11Fe4Ni4);
3) $E = 201$ ГПа – сталь 45

Обработка материалов с большим модулем упругости также вызывает увеличение механических нагрузок на инструмент. Для выявления зависимости эквивалентных напряжений в алмазе выглаживателя от модуля упругости обрабатываемого материала был проведен однофакторный эксперимент, исходные данные и результат которого приведены в таблице 1.

Значительный рост эквивалентных напряжений в алмазе выглаживателя, достигающих пределов прочности материала, может приводить к уменьшению его стойкости, повреждению рабочей поверхности кристалла и выходу инструмента из строя (рис. 6). С этой позиции анализировались режимы выглаживания и геометрия инструмента.

Скорость выглаживания имеет определяющее влияние на производительность процесса. Ограничивающим фактором, влияющим на скорость и соответственно на производительность технологического процесса в целом, является теплостойкость алмаза. Наибольшая скорость

выглаживания, ограничиваемая теплостойкостью алмаза, равна 400–600 м/мин. Но при выглаживании железоуглеродистых материалов уже при скорости 200 м/мин повышение температуры в зоне выглаживания приводит к значительному ускорению износа кристалла из-за графитизации алмаза и диффузионных процессов [8]. Работа в таких режимах не является целесообразной, что наиболее выражено проявляется при обработке стали.

Таблица 1 – Исходные данные и результат однофакторного эксперимента для изучения механической нагруженности инструмента

Наименование	Значение		
Радиус рабочей поверхности алмаза, R , мм	2		
Скорость выглаживания, v , м/мин	100		
Глубина выглаживания, t , мкм	8		
Модуль упругости обрабатываемого материала, E , ГПа	69	135	201
Эквивалентные напряжения в алмазе выглаживателя, МПа	794	978	1473

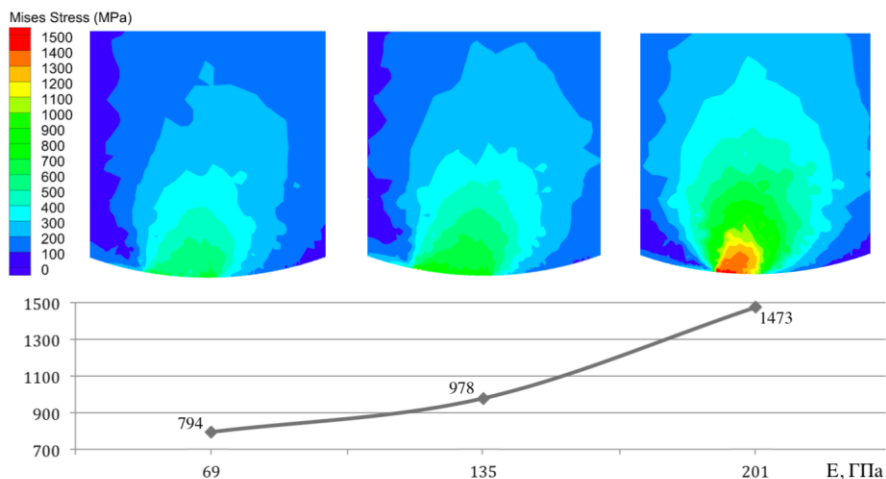


Рисунок 6 – Изменение напряжений в алмазе выглаживателя в зависимости от модуля упругости E обрабатываемого материала

Влияние режимов выглаживания на эквивалентные напряжения в поверхностном слое обрабатываемой детали показано на рисунке 7.

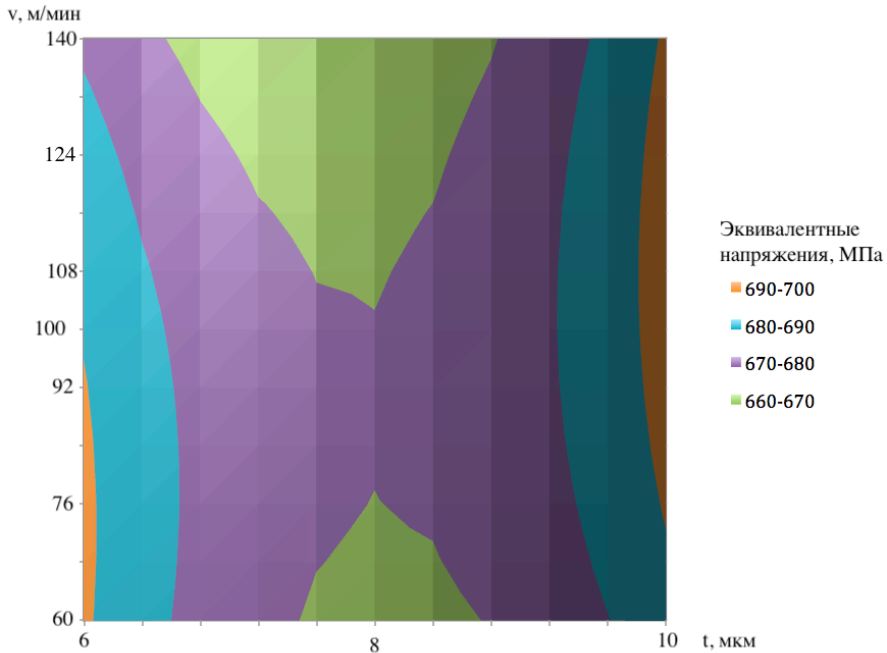


Рисунок 7 – Зависимость эквивалентных напряжений в поверхностном слое обрабатываемой детали от скорости v и глубины выглаживания t

Анализ результатов расчета показал, что при изменении скорости выглаживания от 60 до 140 м/мин эквивалентные напряжения в материале детали в процессе обработки изменяются всего на 3–4 %. Таким образом, скорость выглаживания практически не влияет на упрочнение поверхности детали. Поэтому для достижения максимальной производительности обработки необходимо задавать максимально возможные значения скорости выглаживания, которые не будут приводить к превышению критических температур для алмаза и интенсивному износу выглаживателя.

График изменения температуры алмаза при обработке стали 45 методом алмазного выглаживания показан на рисунке 8. Расчет производился для инструмента с радиусом рабочей поверхности 2 мм при скорости выглаживания 100 м/мин и глубине выглаживания 8 мкм. Максимальное значение температуры инструмента составило 146,9 °С.

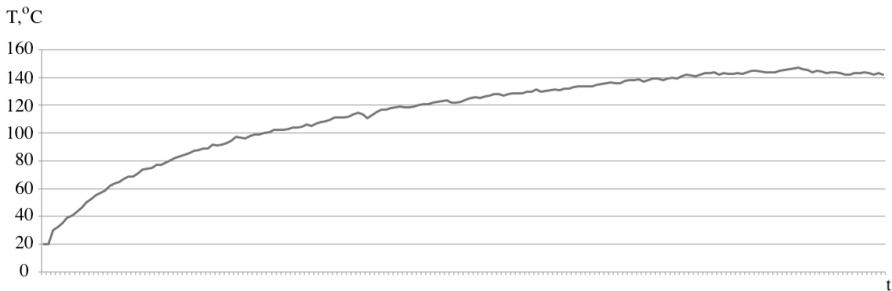


Рисунок 8 – График изменения температуры алмаза от времени выглаживания t (мин) при обработке стали 45

Для повышения производительности процесса выглаживания и уменьшения износа инструмента целесообразно использовать различные способы улучшения теплоотвода из зоны обработки – использование СОТС, оптимизация инструмента с целью увеличения его теплоотдачи (теплопроводный материал выглаживателя и припоя, закрепляющего алмаз в инструменте; максимально возможная площадь соприкосновения припоя с поверхностью алмаза; оптимизация формы инструмента за счет ребер охлаждения).

Влияние глубины выглаживания на эквивалентные напряжения в поверхностном слое обрабатываемой детали, как показало моделирование, также невелико (рис. 7). Поэтому, для обеспечения оптимального результата обработки, глубина выглаживания должна быть достаточной для полного сглаживания микронеровностей поверхности заготовки, но при этом не превышать значений, после которых появляются вибрации, ухудшающие качество обработанной поверхности [9].

Под изменением геометрии рабочей поверхности выглаживателя, имеющего сферическую форму, понималось варьирование ее радиуса. На рисунке 9 показано влияние радиуса рабочей поверхности алмаза на эквивалентные напряжения в поверхностном слое заготовки для обрабатываемых материалов с различными модулями упругости.

Геометрия инструмента имеет различное влияние на эквивалентные напряжения в поверхностном слое деталей при обработке различных материалов. При относительно низком модуле упругости обрабатываемого материала радиус рабочей поверхности алмаза практически не имеет влияния на значения эквивалентных напряжений в поверхностном слое. Но при его росте геометрия рабочей поверхности приобретает все большее значение.

Моделирование показало значительное влияние радиуса рабочей поверхности алмаза на эквивалентные напряжения в поверхностном слое при обработке стали 45. Изменение радиуса от 3 до 1 мм вызвало значительный

рост напряжений в материале детали, что благоприятно влияет на результат обработки, приводя к увеличению показателей упрочнения обрабатываемой поверхности и увеличению в ней остаточных сжимающих напряжений.

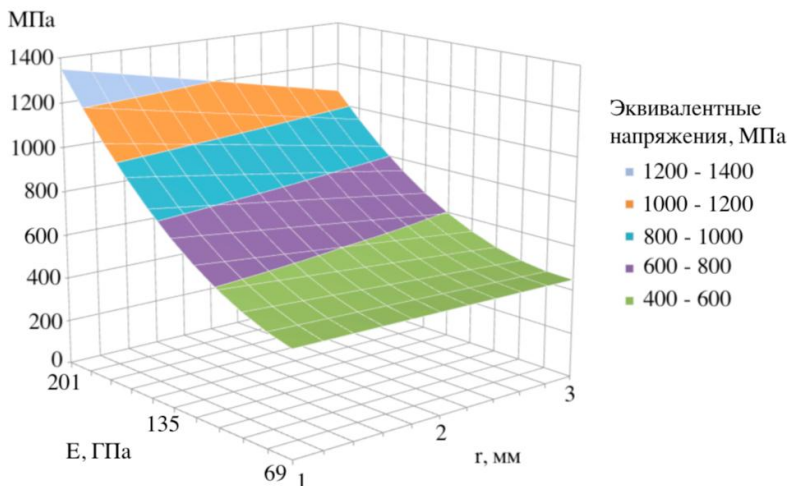


Рисунок 9 – Влияние радиуса рабочей поверхности алмаза выглаживателя на эквивалентные напряжения в поверхностном слое заготовки для материалов с различным модулем упругости

Для определения рациональной величины радиуса рабочей поверхности инструмента для обработки стали 45 было изучено влияния радиуса на эквивалентные напряжения в поверхностном слое обрабатываемой детали и алмазе инструмента (рис. 10).

Изменение радиуса рабочей поверхности алмаза с 3 до 1 мм приводит к увеличению напряжений в алмазе с 1391 до 1539 МПа и в поверхностном слое заготовки с 1056 до 1383 МПа. Соответственно полезный прирост эквивалентных напряжений в поверхностном слое стали 45 при обработке инструментом с радиусом рабочей поверхности 1 мм составил 327 МПа, что соответствует 31 %. При этом рост напряжений в самом алмазе на 148 МПа или 10,6 % не оказывает значительного влияния на износ инструмента.

Таким образом, для материалов с большим модулем упругости, целесообразно использовать выглаживатели с меньшим радиусом рабочей поверхности. Для материалов с относительно небольшим модулем упругости и небольшой твердостью выглаживатель меньшего радиуса не дает преимущества в упрочнении поверхностного слоя обрабатываемой детали. Такие материалы целесообразно обрабатывать выглаживателями больших радиусов, так как они обеспечивают меньшую шероховатость поверхности. В

частности, для стали 45 рекомендуется использовать выглаживатели с радиусом рабочей поверхности от 1 до 1,3 мм, а для алюминиевых сплавов и бронз от 3 до 3,5 мм.

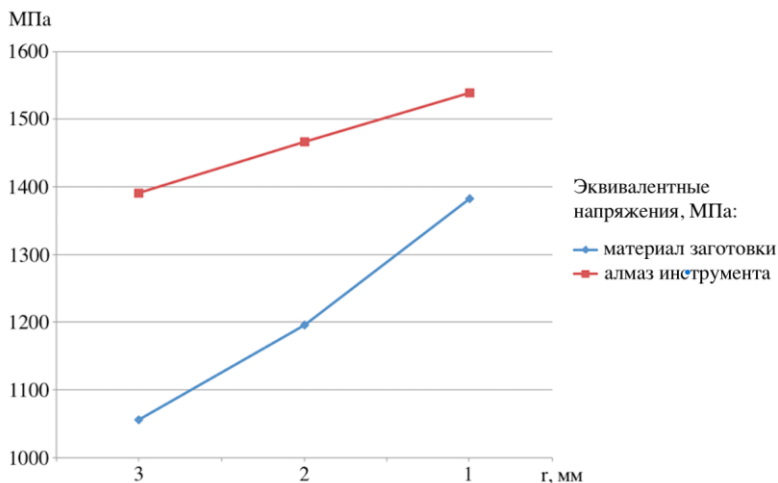


Рисунок 10 – Влияние радиуса рабочей поверхности инструмента на эквивалентные напряжения в поверхностном слое обрабатываемой детали и алмазе выглаживателя при обработке стали 45

(скорость выглаживания $v = 140$ м/мин, глубина выглаживания $t = 6$ мкм)

Компьютерное моделирование процесса алмазного выглаживания в программном комплексе Third Wave Advantedge показало:

- рост модуля упругости обрабатываемого материала приводит к значительному росту эквивалентных напряжений и сил выглаживания в нем, что вызывает усиление его напряженно-деформированного состояния, от которого непосредственно зависит упрочнение поверхности детали. Поэтому материалы, имеющие больший модуль упругости, имеют лучшие показатели упрочнения поверхностного слоя при алмазном выглаживании;

- изменение скорости и глубины выглаживания практически не влияет на напряжения в обрабатываемом материале, при этом рост скорости, увеличивающий производительность обработки, повышает температуры в зоне обработки. Во избежание термоизноса алмаза выглаживателя при высоких скоростях необходимо оптимизировать теплоотвод из зоны обработки, используя СОТС и инструмент с повышенной теплоотдачей;

- влияние радиуса рабочей поверхности инструмента возрастает с ростом модуля упругости обрабатываемого материала: чем он выше, тем меньший радиус рабочей поверхности выглаживателя обеспечивает

необходимое упрочнение обрабатываемой поверхности. И чем меньше модуль упругости выглаживаемого материала, тем больший радиус рабочей поверхности инструмента рекомендуется применять для достижения малой величины шероховатости обрабатываемой поверхности.

Список использованных источников: 1. *Титов А. В.* Моделирование повторной операции выглаживания методом конечных элементов / *А. В. Титов, Л. В. Шмелева, Е. А. Кириенко, О. В. Герасимова* // *Обработка материалов давлением: Сборник научных трудов.* – Краматорск: ДГМА, 2015. – № 2 (41). – С. 81–86. 2. *Advantedge, Third Wave Systems* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: // www.thirdwavesys.com/advantedge – 06.02.2018 г. – Загл. с экрана. 3. *Криворучко Д. В.* Моделирование процессов резания методом конечных элементов: методологические основы: монография / *Д. В. Криворучко, В. А. Залого*; под общ. ред. В. А. Залого. – Сумы: Университетская книга, 2012. – 496 с. 4. *Торбило В. М.* Алмазное выглаживание. – М.: Машиностроение, 1972. – 104 с. 5. *Спиридонов А. А.* Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / *А. А. Спиридонов.* – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с. 6. *Суслов А. Г.* Качество поверхностного слоя деталей машин. – М.: Машиностроение, 2000. – 320 с. 7. *Смелянский В. М.* Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. – М.: Машиностроение, 2002. – 300 с. 8. *Клименко С. А.* Финишная обработка поверхностей при производстве деталей / *С. А. Клименко*; под общ. ред. С. А. Чижика и М. Л. Хейфеца. – Минск: Беларуская наука, 2017. – 376 с. 9. *Кузнецов В. П.* Имитационное моделирование влияния параметров технологической системы на виброустойчивость выглаживания поверхностей деталей // *Металлообработка.* – 2010. – № 1 (55). – С. 7–15.

Bibliography (transliterated): 1. *Titov A. V.* Modelirovanie povtornoj operacii vyglazhivaniya metodom konechnyh elementov / *A. V. Titov, L. V. Shmeleva, E. A. Kirienko, O. V. Gerasimova* // *Obrabotka materialov davleniem: Sbornik nauchnyh trudov.* – Kramatorsk: DGMA, 2015. – № 2 (41). – S. 81–86. 2. *Advantedge, Third Wave Systems* [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: // www.thirdwavesys.com/advantedge – 06.02.2018 g. – Zagl. s ekrana. 3. *Krivoruchko D. V.* Modelirovanie processov rezaniya metodom konechnyh elementov: metodologicheskie osnovy: monografiya / *D. V. Krivoruchko, V. A. Zaloga*; pod obsh. red. V. A. Zalogi. – Sumy: Universitetskaya kniga, 2012. – 496 s. 4. *Torbilo V. M.* Almaznoe vyglazhivanie. – M.: Mashinostroenie, 1972. – 104 s. 5. *Spiridonov A. A.* Planirovanie eksperimenta pri issledovanii tehnologicheskikh processov / *A. A. Spiridonov.* – M.: Mashinostroenie, 1981. – 184 s. 6. *Suslov A. G.* Kachestvo poverhnostnogo sloya detalej mashin. – M: Mashinostroenie, 2000. – 320 s. 7. *Smelyanskij V. M.* Mehanika uprochneniya detalej poverhnostnym plasticheskim deformirovaniem. – M.: Mashinostroenie, 2002. – 300 s. 8. *Klimenko S. A.* Finishnaya obrabotka poverhnostej pri proizvodstve detalej / *S. A. Klimenko*; pod obsh. red. S. A. Chizhika i M. L. Hejfecy. – Minsk: Belaruskaya nauka, 2017. – 376 s. 9. *Kuznecov V. P.* Imitacionnoe modelirovanie vliyaniya parametrov tehnologicheskoy sistemy na vibroustojchivost vyglazhivaniya poverhnostej detalej // *MetallООbrabotka.* – 2010. – № 1 (55). – С. 7–15.

Надійшла до редколегії 25.06.2018

УДК 621.865.8

V.M.Chupryna, Doctor of Technical Sciences, Chernihiv, Ukraine

THE SPATIAL RIGIDITY OF TECHNOLOGICAL ROBOTS ПРОСТОРОВА ЖОРСТКІСТЬ ТЕХНОЛОГІЧНИХ РОБОТІВ

В статье рассмотрена актуальная проблема определения пространственной статической жесткости «однодуговых» и «двуручных» технологических промышленных роботов. Разработана методика расчета и построения поверхности пространственной жесткости промышленного робота с целью дальнейшего использования для определения точности механической обработки деталей путем резания. Установлено, что подход к определению пространственной жесткости обрабатывающих машин является общим для роботов и станков.

Ключевые слова: промышленные роботы, пространственная жесткость, статическая жесткость

Розглянуто актуальну проблему визначення просторової статичної жорсткості технологічних промислових роботів "одношарова" та "дворучна". Розроблено метод обчислення та конструювання поверхні просторової жорсткості виробничого робочого робота з метою подальшого використання для визначення точності механічної обробки деталей за допомогою різання. Встановлено, що підхід до визначення просторової жорсткості обробних верстатів є загальним для обох роботів та верстатів.

Ключові слова: промислові роботи, просторова жорсткість, статична жорсткість

The article considers the actual problem of determining the spatial static rigidity of "one-arc" and "two-handed" technological industrial robots is considered. The method of calculating and constructing the surface of the spatial rigidity of a manufacturing industrial robot with the purpose of further use for determining the accuracy of machining of parts by cutting is developed. It is established that the approach to determining the spatial rigidity of machining machines is common for both robots and machine tools.

Keywords: industrial robots, spatial stiffness, static rigidity

In the automated productions are widely used technological industrial robots (IR), which perform transport, welding, painting and other operations (Figure 1). Along with CNC machines, technological machining IRs are widely used for processing objects of cutting production (Figure 1d). At the same time, processing IR is used for milling, drilling, boring and other mechanical precision machining operations.



a) b) c) d)

Figure 1. Industrial robots of various technological purposes

a) transport; b) welding; c) painting; d) processing

The overwhelming majority of the IRs are "one-handed" robots that have simple, traditional chain-type arrangements with a number of "knees" three or more (Figure 2a,b). A more complex arrangement has "two-handed" IR (Figure 2c). Robots which are based on mechanisms with parallel kinematics of "hexapod" type (Figure 2d) are produced as well and others.

It is designed that at the end element of the IR the special flange is provided and a working element is attached to it. The examples of the working elements are special grab, a welding head or a paint sprayer, and on the machining IR - spindle assembly (Figure 3).

Machining IRs are used in those mechanical operations, where they are able to provide the required precision machining. The accuracy of processing depends on the properties of the robots elastic system (ES), in particular on the characteristics of rigidity in the cutting zone. The main problem of the use of machining robots is the uncertainty of the rigidity of an elastic system, which varies in space, depending on the direction of the force of cutting.



a)



b)



c)



d)

Figure 2. Compositions of industrial robots

a) with 3 "knees"; b) with 8 "knees"; c) "two-handed"; r) "hexapod"

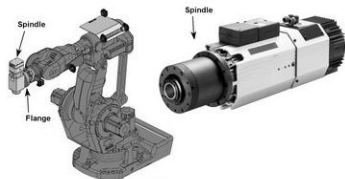


Figure 3. Usage of a special flange for attaching the working body of the IR (in these cases – the spindle node)

The purpose of the work is an analytical definition for building the surfaces of the spatial rigidity of "one-arc" and "two-handed" machining industrial robots.

Consider the design of "one-armed" machining robot (Figure 4).

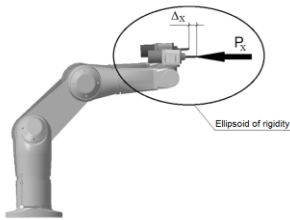


Figure 4. "One- handed " IR with an ellipsoid of rigidity

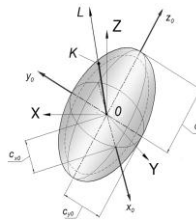


Figure 5. Typical ellipsoid of rigidity

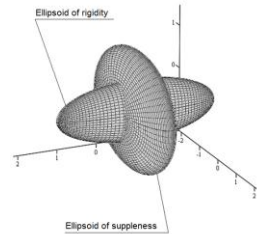


Figure 6. Hedged ellipsoids of rigidity and suppleness

The static rigidity of the IR along the X axis is defined as $C_X = P_X / \Delta_X$. Along other axes - are similar. The spatial rigidity of a technological processing machine (machine or robot) is represented in the form of ellipsoids of rigidity with the center in the cutting zone (point O) that are shown in [1,2]. Ellipsoid rigidity is constructed on the main rigidity of the ES and is mathematically described by a matrix of rigidity in the form

$$C = \text{diag}[C_{x0}, C_{y0}, C_{z0}, C_{\varphi x0}, C_{\varphi y0}, C_{\varphi z0}], \quad (1)$$

which consists of elements of translational rigidity along the corresponding axes C_{x0}, C_{y0}, C_{z0} , and a rotary rigidity around the same axes $C_{\varphi x0}, C_{\varphi y0}, C_{\varphi z0}$. In the general case, the directions of the main axes of rigidity do not coincide with the directions of the coordinates of the system axes.

In the cutting zone, the accuracy of the processing is practically influenced only by the translational spatial rigidity, which is geometrically realized by the surface of the ellipsoid constructed with the center at the point O in the three-dimensional coordinate system (Figure 5). In a tensor number, an ellipsoid of translational rigidity is described by a quadratic form (quadric) and a second order tensor (analogous to the inertial tensor).

$$C^{II} = \begin{bmatrix} C_{x0} & 0 & 0 \\ 0 & C_{y0} & 0 \\ 0 & 0 & C_{z0} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Sometimes it is more convenient to use an ellipsoid of suppleness, which is reciprocal (conjugated) to the ellipsoid of rigidity and is constructed similarly (Figure 6). With known cutting forces P with the help of robots ES ellipsoids, can determine the deformation values in the cutting zone in any direction of the working space.

Two robots can be used to process parts (Figure 7a): one cutting tool (with a rigidity ellipsoid C1), and the other - a fixing part in the working space (with a rigidity ellipsoid C2).

During cutting, the centers of both ellipsoids coincide in one point O (the center of the cutting zone). In this case, the resulting rigidity of the system will be reduced and described not by the ellipsoid, but by the resulting surface of rigidity. This surface can be constructed graphically based on the matrix expression

$$C = [C_1 + C_2]^{-1} \cdot C_1 \cdot C_2 \quad (3)$$

During processing, various cutting tool arrangement locations are possible with respect to the workpiece, as it is shown in the part in Figure 8. In this case, unlike the location of the axes in Figure 7, the ellipsoid axes will no longer be collinear and the shape of the surface of the spatial rigidity will be even more distinct from the ellipsoid.

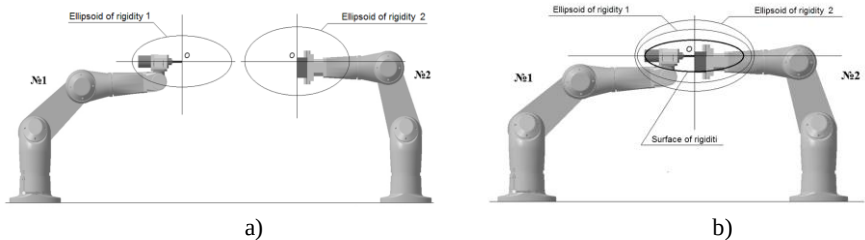


Figure 7. Application of two industrial robots with two ellipsoids of rigidity (C1 and C2)
a) in a non-working condition; b) during cutting



Figure 8. Variants of technological schemes of processing by two robots

In this case, the matrix expression (3) will be changed taking into account the matrices M1 and M2 of the rotation of the ellipsoids relative to the principal coordinate axes of the system, respectively

$$C = [C_1 M_1 + C_2 M_2]^{-1} \cdot C_1 M_1 \cdot C_2 M_2 \quad (4)$$

In industry, the aforementioned version of the usage of two robots was transformed into the creation of "two-handed" robots, depicted in Figure 9.

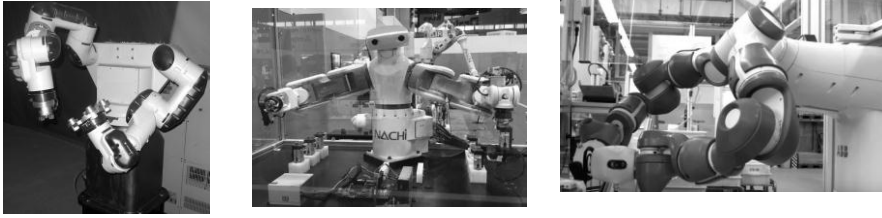


Figure 9. Options for the layout of two-handed industrial robots

Thus, the layout of "two-handed" machining robots is actually reduced to the layout of the machine tools, in which the subsystems of the tool and the parts interacting through the cutting process are attached to the base subsystem (frame). That is, in the IR can be used methods of study of spatial rigidity, which are used for the study of machines, for example, from work [3].

Conclusions

As the results of research that were carried out, the general approach to the definition of spatial static rigidity of machining robots practically do not differ from the similar approach to the definition of spatial rigidity of machine tools.

The developed approach to the determination of the spatial static rigidity of the processing technological robots should be used when using "one-armed" and "two-handed" industrial robots. This allows the design stage to determine the surface of the static spatial rigidity of the design of the industrial robot, and allows in the future to choose the rational modes of processing and to predict the accuracy of the machined parts.

References: 1. Poduraev Yu.V. *Mechatronika: osnovy, metody, primeneniye: uchebn. Pos. dla vuzov.* / Yu.V. Poduraev – M.: Mashinostroenie, 2006. – 256p. 2. Strutyns'ky V.B., Chupryna V.M. Rozrobka tenzorno-geometrychnoi modeli prostоровoi gorstkosti shpindel'nogo vuzla metalorizal'nogo verstatu // *Systemy obrobky informacii.* — 2016. — № 1(138). — P. 47-52. 3. Strutyns'ky V.B., Chupryna V.M. Tenzorno-geometrychna model prostоровoi gorstkosti metalorizal'nogo verstatu // *Systemy obrobky informacii.* – 2016. – № 2(139). – P. 56-62

Надійшла до редколегії 20.06.2018

УДК 621.6

О.М. Шелковий, д-р техн. наук, В.А. Фадєєв д-р техн. наук,
О.В.Набока, канд. техн. наук, Харків, Україна

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗБОРКИ СКЛАДНИХ МАШИНОБУДІВНИХ ВИРОБІВ НА ЗАСАДАХ ІНТЕГРАЦІЇ МЕХАНОСКЛАДАЛЬНИХ ОПЕРАЦІЙ

Рассмотрены вопросы повышения эффективности сборки сложных машиностроительных изделий на принципах интеграции механосборочных операций.

Ключевые слова: машиностроительные изделия, эффективность сборки, механосборочные операции

Розглянуто питання підвищення ефективності збирання складних машинобудівних виробів на принципах інтеграції механоскладальних операцій.

Ключові слова: машинобудівні вироби, ефективність збирання, Механоскладальні операції

The problems of increasing the efficiency of assembly of complex machine-building products on the principles of integration of mechanic-assembly operations are considered.

Keywords: machine-building products, assembly efficiency, mechanical assembly operations

Практика організації виробництва каже про те, що рівень ручної праці та її спеціалізація при складанні виробів залежить як від складності складальної одиниці, так і від програми її виготовлення (рис. 1). У аерокосмічній промисловості найбільш трудомісткими, з точки зору складання, є вироби, в які входять понад 20 з'єднаних деталей (складні машинобудівні вироби - СМВ).

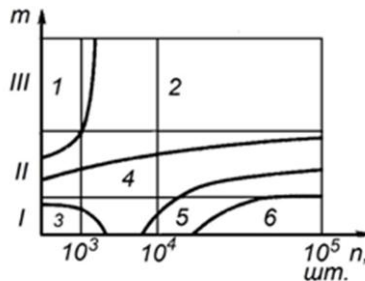


Рисунок 1. Сфери застосування різних способів зборки в залежності від річної програми випуску (n) і складності виробу (m):

I – прості вироби (до 5 – 8 деталей); *II* – вироби середньої складності (6 – 20 деталей);
III – складні вироби (більше 20 деталей);

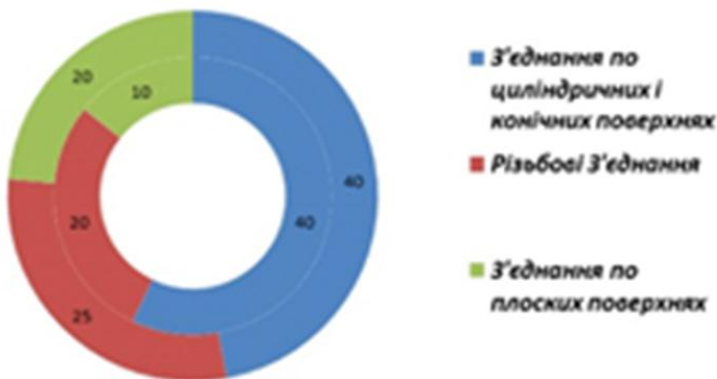
1 – ручна зборка; 2 – ручна механізована зборка; 3 – зборка з використанням універсальних роботів; 4 – зборка з використанням спеціалізованих роботів; 5 – зборка з використанням спеціальних роботів; 6 – спеціалізовані робочі місця.

В сучасному машинобудівному виробництві формування виробів виконується із застосуванням методів з'єднання, що надані на рис. 2, А. В СМВ найбільш поширеними є з'єднання, що наведені на рис. 2, Б.

Для виконання цих з'єднань в сучасній практиці механоскладального виробництва застосовуються технологічні прийоми, які залежать як від виду об'єкта складання, так і від організаційних умов її виконання (рис. 3, А). В той же час, із рис. 3, Б видно, що в умовах дрібносерійної зборки підгінні, регульовальні та, супроводжуючі їх, демонтажні роботи в загальній трудомісткості зборки складають від 43% до 49%. Зменшення долі цих робіт в загальних витратах робочого часу і трудовитратах на зборку може істотно зменшити собівартість продукції, поліпшити та стабілізувати якість виробів в партії.



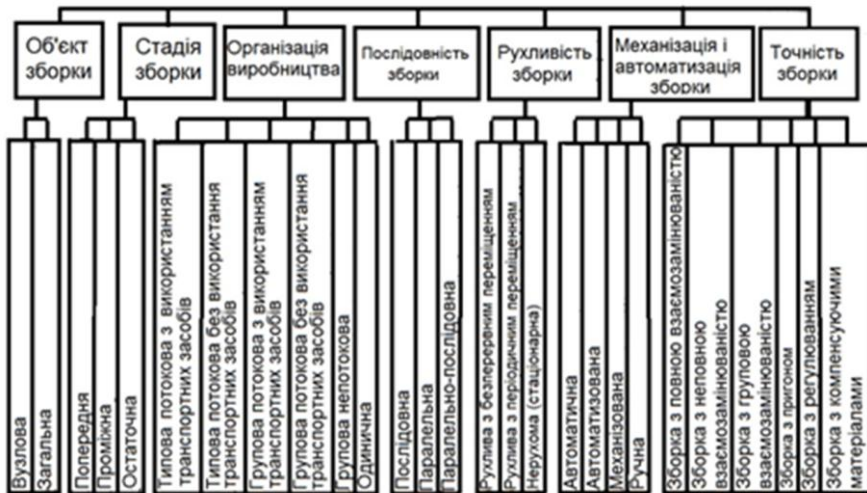
А. – Класифікація видів з'єднання (за А.М. Балабановим)



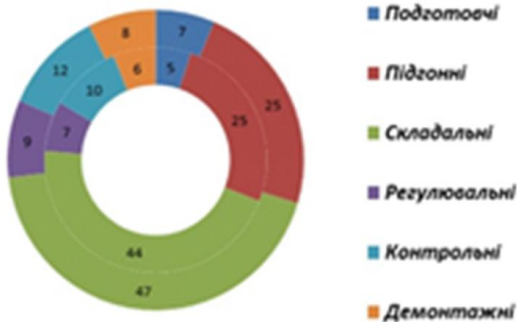
Б. – Відсоток з'єднань, що найбільш часто використовуються у СМВ

Рисунок 2. Класифікація та відсоток з'єднань, що найбільш часто використовуються у СМВ

Складання СМВ передбачає послідовне формування з'єднань між деталям і та складальними одиницями з урахуванням серійності процесу виробництва, точності СМВ і рівня механізації та автоматизації виробничих процесів (рис. 4, А). При цьому вирішується комплекс задач, що пов'язані з послідовністю встановлення деталей, їхнього з'єднання, послідовність зборки складальних одиниць, порядку зборки та формування її функціональних параметрів (рис. 4, Б). При вирішенні кожної з цих задач в умовах серійного виробництва може виникнути ситуація, пов'язана з необхідністю регулювання положення одних деталей відносно інших, або їхньої додаткової механічної обробки з метою формування замикаючих розмірів складальних ланцюгів.



А. – Класифікація видів зборки (за А.М. Балабановим)



Б. – Питома вага трудомісткості робіт дрібносерійної зборки

Рисунок 3. Класифікація видів зборки та питома вага трудомісткості робіт дрібносерійної зборки

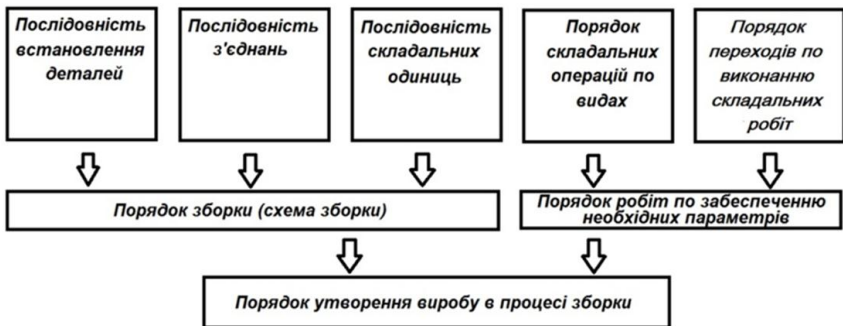
Таким чином, виникає потреба в інтеграції зборки з механічною обробкою деталей на окремих операціях. Це призводить або до селекції деталей, що збираються, або їхньої механічної обробки чи просторовому регулюванні.

Управління цими процесами ще до з'єднання деталей в складальні одиниці можливо в тому випадку, якщо будуть встановлені причинно-наслідкові зв'язки між процесами зборки та механічної обробки окремих деталей.

Аналіз послідовності утворення виробу та її зв'язок механічною обробкою деталей (рис. 5) вказують на наявність причинно-наслідкових зв'язків між відстанями поміж деталями в складальній одиниці, властивостями з'єднань та способами забезпечення точності вузла, з однієї сторони, та етапами механічної обробки деталей, на яких формуються ці параметри, з іншої.

Організаційна форма зборки	Сформувати базові структурні одиниці виробу.
Склад складальних одиниць	Сформувати складальні одиниці з елементів виробу, що відповідають вимогам: можливість незалежної зборки; винесення максимального об'єму складальних робіт із загальної зборки на вузлову; окреме виділення з'єднань, що вимагають спеціального устаткування; визначеність базування усіх елементів складальної одиниці; відсутність елементів, що закривають доступ елементам з інших складальних одиниць; можливість забезпечення точності заданим способом.
Спосіб забезпечення точності	Побудувати схему базування. Виявити і розрахувати розміри ланцюги. Виявити деталі-компенсатори і визначити умови їх постачання.
Порядок утворення виробу.	Побудувати можливий порядок установки деталей. Побудувати порядок з'єднань. Побудувати порядок складальних одиниць. Побудувати порядок складальних операцій по видах Побудувати порядок переходів по виконанню складальних робіт.
Склад операції.	Визначити межі етапу послідовності утворення виробу, що виконується в окремій операції. Визначити технологічні засоби, необхідні для виконання робіт на даному етапі. Визначити або розрахувати параметри (розмірні або функціональні), які необхідно забезпечити на цьому етапі.

А. Завдання на проектування технології зборки СМВ.



Б. Зміст завдання що до побудови порядку утворення виробу за технологічним процесом зборки.

Рисунок 4. Завдання на проектування та порядок утворення виробу методами дрібносерійного складання

Відомо, що навіть правильно виготовлені деталі не дають гарантії того, що з них може бути зібраний вузол без допоміжних операцій і переходів, на

Тоді інформація про послідовність зборки деталей в складальну одиницю стає тією керуючою інформацією, яка задає послідовність обробки деталей, що входять до цього вузла. Такий підхід до проектування технологічних процесів складання і механічної обробки (ТПСіМО) деталей вузла в купі з реальною обробкою деталей та їхньою зборкою в складальну одиницю зображено на рис. 6.

У якості вихідних даних для проектування ТПСіМО використовуються: 3D модель складального вузла; планування дільниць, на яких виконується зборка вузла та механічна обробка його деталей; параметри устаткування, що використовується; структури ТПСіМО, які можуть бути використані; розміри виробничих завдань та послідовність їхнього виконання.

На етапі формування варіантів упорядкування послідовностей зборки деталей у вузлі розраховується коефіцієнт зборки (k_{sb}), за значенням якого ранжуються базові деталі у складальному вузлі (тобто такі деталі, на які базуються інші деталі в зборці).

Вибір деталі для кріплення виконується після того, як до i -ї базової деталі приєднується $i+1$ базова деталь.

Узагальнену методику 3D - моделювання функціональних характеристик СДЗ СМВ можна навести у вигляді наступних етапів (рис. 6):

I етап – розробка зборки 3D моделі обладнання, що моделюється, яка відповідає початковому положенню об'єктів імітації в CAD Solid Works .

II етап – конвертація елементів 3D моделі: *.SLDASM $\rightarrow$ *.STL зі зберіганням їхнього положення у просторі.

III етап – встановлення лінійного та кутового положення локальних осей координат елементів 3D моделі. В подальшому результати цього етапу застосовуються для програмування процесу переміщення елементів 3D моделі (рис. 6). **IV етап - накладення зв'язків (прив'язка) об'єктів, що входять до імітаційної моделі.** Перед початком прив'язки об'єктів моделі визначають їхню функціональну взаємозалежність (зміщення, поворот та інші), а потім шляхом формування відносин взаємозалежності між елементами моделі формується граф прив'язки (рис. 6).

V етап - побудова програми 3D моделювання складального модуля. Для написання програми використовуємо команди: зсув, поворот, очікування, цикл, умова, одночасно, команда.

Зберігаємо модуль. Модуль зберігається у форматі (*.GPM3D).

Для реалізації методики оптимізації організаційно-технологічної структури СДЗ СМВ побудовано функціональну модель системи імітаційного 3D - моделювання складальних процесів. В неї закладено принцип єдиного простору функціонування системи імітаційного моделювання виробничих систем складання вузлів. СДЗ СМВ складається з системного монітора (СМ), який керує перетворенням інформації як в процесі моделювання, так і при підготовці вхідної інформації (рис. 7).

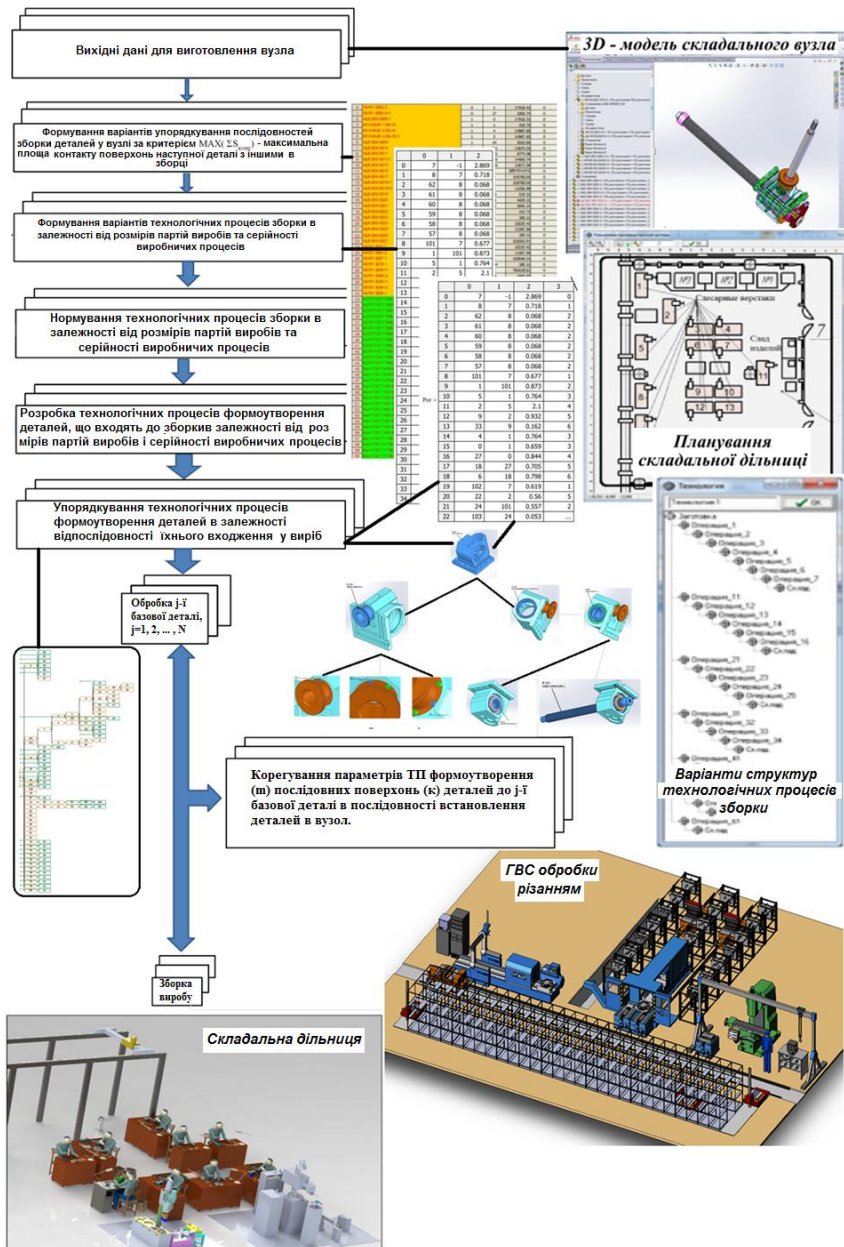


Рисунок 6. Загальна схема інтегрованої технології механоскладального виробництва CMV

У системі керування базами даних (СУБД) сконцентровані всі дані імітаційного моделювання. До них відноситься: опис моделей; вхідні параметри для моделювання; результати моделювання. Підсистема опису структури елементів моделі описує взаємозв'язки елементів моделі. Підсистема опису структури моделі формує структури моделі, чітку послідовність вхідних елементів у моделі.

Відправною точкою для формування імітаційної моделі виробничої системи є організаційно-технічна структура підрозділу. До її складу входять структура і параметри транспортно-накопичувальної і складальної підсистем та їхнє розміщення. Тому процес створення імітаційної моделі розпочинається з накопичення переліченої вище інформації. Для цього використовуються наступні підсистеми:

Генератор імітаційної моделі транспортної системи (ГІМТС) розташовує на плануванні цеху транспортно-накопичувальне і оброблювальне устаткування, а так само створює транспортні шляхи, по яких переміщуються матеріальні потоки в ході виконання виробничого завдання.

Транспортно-накопичувальне і збиральне устаткування має свої моделі, що управляють, синтезуються Генератором імітаційних моделей виробничих модулів (ГІМВМ).

Основою для його роботи є 3D моделі вузлів і механізмів, що зберігаються у базі даних (БД устаткування), а так само технологічна інформація про режим їх роботи (БД процес), рис. 7.

Структурно-функціональна схема системи імітаційного моделювання виробничих процесів

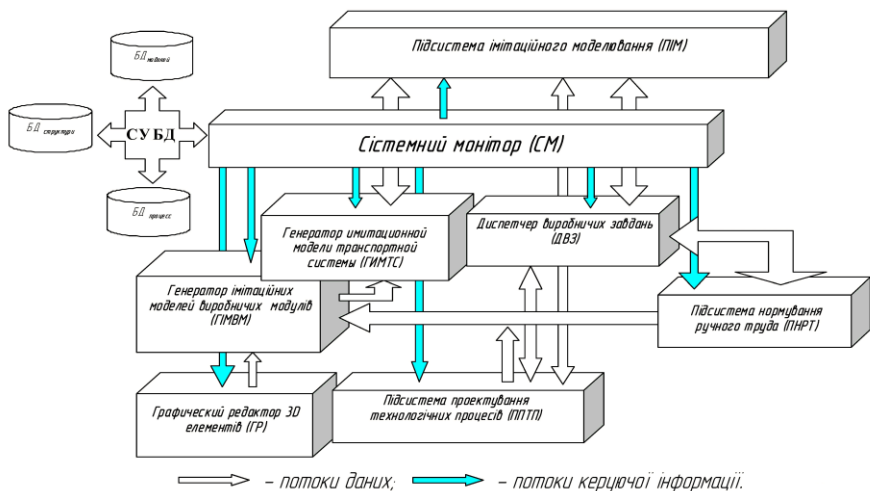


Рисунок 7. Функціональна модель системи імітаційного 3D - моделювання складальних процесів

Джерелами інформації для БД про устаткування і технологічні процеси є: Під-система проектування типових технологічних процесів (ПП ТП); підсистема нормування ручної праці (ПНРП). Вони реалізовані у вигляді автономних підсистем і управляються системним монітором.

Графічний редактор 3D елементів (ГР) генерує графічні 3D моделі динамічних і статичних об'єктів візуальної частини імітаційної моделі (це може бути: Solid Works, ProEngineer, Inventor або інша CAD системи).

ПП ТП здійснює пошук типових технологічних маршрутів складання виробів у базі даних (БД процес, рис. 7), як для початкової стадії проектування, так і в ході імітації процесу складання (рис. 9). Особливість системи моделювання полягає в тому, що технологічний процес, прийнятий як початковий у момент запуску партії виробів на збирання може коригуватися залежно від поточної виробничої ситуації (відмови силових агрегатів або відсутність вільного устаткування для виконання завдання та ін.). Для цього передбачений механізм опитування усіх об'єктів моделювання з метою аналізу їх стану (зайнятий, вільний, чекає завантаження та ін.). Якщо вільне устаткування дозволяє реалізувати один з варіантів типового технологічного процесу так, щоб з одного боку, виконати складання усієї партії виробів в терміни, що не перевищують час встановлене завданням, а з іншою, щоб час на переміщення і зборку виробу на новому робочому місці по новому технологічному процесу не перевищував часу на складання і переміщення до верстата, по існуючому технологічному процесу, зайнятому на момент опитування, то він приймається як робочий процес. При цьому враховується наявність вільних транспортних пристроїв.

Внаслідок чого формується новий технологічний процес, який в якості типового процесу заноситься у базу даних (БД процес, рис. 7).

Моделювання оброблювальних і транспортних модулів з використанням ручної праці припускає знання функціональних характеристик робітників (швидкостей переміщення, повороту, підйому і опускання вантажу, вантажопідйомності, помилковості, стомлюваності та ін.). Ці характеристики нормуються в Підсистемі нормування ручної праці (ПНРП) і передаються ГИМТС і ГИМПМ.

У функції ГИМТС так само входить рішення задачі створення транспортних шляхів і "прив'язки" до них технологічного устаткування. З цієї метою для кожного виробничого підрозділу (цеху, ділянки, оброблювального модуля) створюється своя транспортна мережа (рис. 8) і за нею закріплюються оброблювальні модулі, склади і транспортне устаткування. У рамках транспортної мережі вказуються місця завантаження, розвантаження устаткування, перераховуються технологічні і складські модулі обслуговувані різними видами транспортних пристроїв. Уся перебічена вище інформація зберігається у БД устаткування і БД планування.

Диспетчер виробничих завдань (ДВЗ) реалізує функції планування і контролю їх виконання. Завдання на збирання виробів можуть бути сформовані не лише до моменту запуску ПІМ, але і в ході моделювання виробничого процесу. ДВЗ "прив'язує" виробничі завдання до конкретних технологічних процесів і ставить їх в чергу. Витягання завдань з черги здійснюється ПІМІВ відповідно до концепції максимальної пропускної спроможності системи збирання. ДВЗ фіксує стан партій зборки на момент переривання процесу моделювання. Він дозволяє зберегти цю інформацію у базі даних і в подальшому запусити процес моделювання не з початку, а з точки зупинки. Такий підхід до моделювання особливо актуальний в тих випадках, коли процес імітації поєднується з роботою виробничої системи.

Переміщення інформації між підсистемами, контроль її цілісності і актуальності здійснює СУБД.

Після того, як усі структурно-параметричні складові моделі введені, СМ тестує її і передає управління ПІМ.

До складу ПІМІВ входить візуальна, текстова і графічна компоненти. Візуальна компонента ПІМІВ дозволяє спостерігати за процесом моделювання по діях, що відбуваються на плануванні. Вона реалізована у вигляді 3D динамічної векторної графіки, та у вигляді графіків стану обладнання та систем (рис. 9).

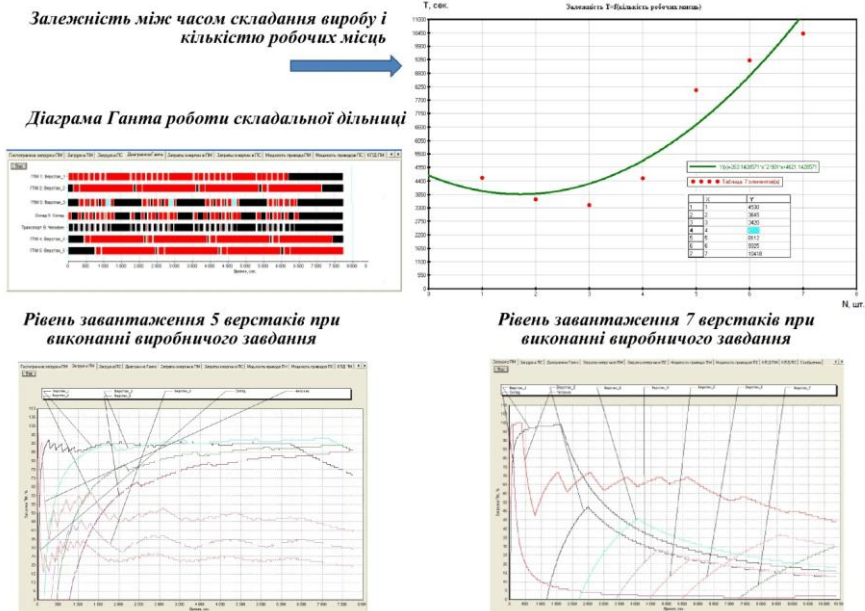


Рисунок 9. Приклади побудови графіків функціонування механоскладального виробництва

Висновки:

1. У статті виконано теоретичне узагальнення і нове розв'язання науково-технічної задачі підвищення ефективності механоскладального виробництва складних машинобудівних виробів шляхом прогнозування структур та параметрів систем організаційно-технологічної і технічної підготовки виробництва на засадах 3D імітаційного моделювання.
2. Запропонована узагальнена математична тривимірна модель функціональної структури системи обробки- зборки на основі об'єктно-орієнтованого проектування.
3. Наведено механізм імітаційного 3D - моделювання роботи системи обробки - зборки.
4. Розроблено математичні моделі переходу від 3D моделі вузла до 3D моделей складального та механообробного технологічних процесів.
5. Розроблено узагальнену методику формування структури і параметрів технологічних процесів складання і механічної обробки та синхронізації їхнього часу виконання.

Список використаних джерел: 1. *Фадеев В.А., Пермяков А.А., Тимофеев Ю.В., Шелковой А.Н.* Опыт организационно-технологической подготовки предприятий аэрокосмической промышленности //Технологические системы, научно-технический журнал. - 2010, № 1(50). - С.82 – 87. 2. *Тимофеев Ю. В., Фадеев В. А., Шелковой А. Н., Хицан В. Д., Клочко А. А.* Интеграционная технологическая подготовка промышленного предприятия PLM-решением // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Серія : Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ». – 2015. – № 4(1113). – С. 4–10. 3. *Шелковий О. М., Мартинов М. С., Набока О. В.* Дослідження продуктивності і надійності складання вузла «Гідроагрегат» в умовах автоматизованого виробництва // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Серія : Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ». – 2015. – № 40(1149). – С. 108–112. 4. *Беловол А.В., Клочко А.А., Набока Е.В., Скоркин А.О., Шелковой А.Н.* Имитационное моделирование в задачах машиностроительного производства в 2-х томах, Т. 1: учеб. пособие /под редакций А.Н. Шелкового // - Х.: НТУ «ХПИ», 2016. - 407 с.

Bibliography (transliterated): 1. *Fadeev V.A., Permyakov A.A., Timofeev Yu.V., Shelkovej A.N.* Opyt organizacionno-tehnologicheskoy podgotovki predpriyatij aerokosmicheskoy promyshlennosti //Tehnologicheskie sistemy, nauchno-tehnicheskij zhurnal. - 2010, № 1(50). - S.82 – 87. 2. *Timofeev Yu. V., Fadeev V. A., Shelkovej A. N., Hican V. D., Klochko A. A.* Integracionnaya tehnologicheskaya podgotovka promyshlennogo predpriyatiya PLM-resheniem // Visnik Nacio-nalnogo tehnicnogo universitetu «Harkivskij politehnicnij institut». Zbirnik nauko-vih prac. Seriya : Tehnologiyi v mashinobuduvanni. – Harkiv : NTU «HPI». – 2015. – № 4(1113). – S. 4–10. 3. *Shelkoviy O. M., Martinov M. S., Naboka O. V.* Doslidzhennya produktivnosti i nadijnosti skladannya vuzla «Gidroagregat» v umovah avtomatizovanogo virobniictva // Visnik Nacionalnogo tehnicnogo universitetu «Harkivskij politehnicnij institut». Zbirnik naukovih prac. Seriya : Tehnologiyi v mashinobuduvanni. – Harkiv : NTU «HPI». – 2015. – № 40(1149). – S. 108–112. 4. *Belovol A.V., Klochko A.A., Naboka E.V., Skorkin A.O., Shelkovej A.N.* Imitacionnoe modeliro-vanie v zadachah mashinostroitel'nogo proizvodstva v 2-h tomah, T. 1: ucheb. posobie /pod redakcij A.N. Shelkovogo // - H.: NTU «HPI», 2016. - 407 s.

Надійшла до редколегії 20.06.2018

УДК 621.923

А.А. Якимов, докт. техн. наук, Н.Н. Клименко, канд. техн. наук,
Ю.В. Шихирева, канд. техн. наук, Л.В. Бовнегра, канд. техн. наук
Одесса, Украина

ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ШЛИФОВАНИИ ДЕТАЛЕЙ С КОМПОЗИЦИОННЫМ ПОКРЫТИЕМ

Рассмотрено повышение качества поверхностного слоя при шлифовании деталей с композиционным покрытием из плакированного никель-фосфором и медью карбида титана в результате подачи СОЖ в зону контакта круга с деталью под рассчитанным давлением, несколько большим, чем давление воздуха в контактной зоне, позволяющим получить максимальный охлаждающий эффект.

Установлена зависимость давления воздуха в зоне контакта круга с деталью от изменения режимов шлифования. Определены температура поверхности, остаточные напряжения на поверхности детали и на границе покрытие-подложка при шлифовании различными кругами с использованием СОЖ.

Ключевые слова: качество поверхностного слоя, подача охлаждения под давлением, композиционное покрытие.

Розглянуто підвищення якості поверхневого шару при шліфуванні деталей з композиційним покриттям із плакованого нікель-фосфором і міддю карбиду титану в результаті подачі СОЖ у зону контакту круга з деталлю під розрахованим тиском, трохи більшим, ніж тиск повітря в контактній зоні, що дозволяють одержати максимальний охолоджуючий ефект.

Установлена залежність тиску повітря в зоні контакту круга з деталлю від зміни режимів шліфування. Визначені температура поверхні, залишкові напруження на поверхні деталі й на границі покриття-підложка при шліфуванні різними кругами з використанням ЗОР.

Ключові слова: якість поверхневого шару, подача охолодження під тиском, композиційне покриття.

Improvement of quality of a superficial layer is considered at grinding details with a composite covering from plated by nickel - phosphorus and copper titanium carbide as a result of submission cutting fluid in a zone of contact of a circle with a detail under the designed pressure, a little bit big, than pressure of air in the contact zone, allowing to receive the maximal cooling effect.

Dependence of pressure of air in a zone of contact of a circle with a detail from change of modes of grinding. Is established the temperature of a surface, residual pressure on a surface of a detail and on border a covering - substrate are determined at grinding by various circles with use cutting fluid.

Key words: quality of a superficial layer, submission of cooling under pressure, a composite covering.

Введение: Во многих отраслях техники сейчас уделяется большое внимание композиционным материалам, в которых карбиды либо другие тугоплавкие соединения являются армирующими включениями в более пластичном основном материале. Одним из наиболее прогрессивных способов получения таких композиционных покрытий является высокотемпературное напыление плазменной струей.

Проведенные исследования показали, что наилучшими свойствами по износостойкости и долговечности обладают поверхности полученные путем

плазменного напыления двухоболочковым композиционным плакированным порошком TiC-NiP-Cu.

Применение композиционных покрытий из тугоплавких соединений (на основе карбида титана) позволяет заменить дорогостоящие и редкие металлы менее дефицитными материалами без существенного изменения работоспособности деталей, повысить износо- и коррозионную стойкости деталей, их антифрикционные свойства, надежность и долговечность [1].

Широкое внедрение композиционных покрытий сдерживается трудностями, возникающими в процессе их финишной обработки, где в основном используется шлифование. Шлифование напыленных покрытий характеризуется напряженным состоянием напыленной поверхности. Это обусловлено опасностью отслоения покрытия, которая возникает в процессе шлифования, либо в процессе последующей эксплуатации деталей с покрытиями [2].

Известно, что возникновение дефектов типа прижогов, трещин и отслоения покрытия от подложки связаны с напряжениями возникающими в поверхностном слое. Эти напряжения, особенно при шлифовании труднообрабатываемых материалов, носят температурный характер.

Важным фактором, влияющим на качество поверхностного слоя, как на операции нанесения покрытия, так и при шлифовании, является тепловое воздействие. Исследования температурных остаточных напряжений показывают, что величина напряжений, формирующихся при напылении, обычно в несколько раз меньше, чем при шлифовании. Температурный градиент при шлифовании значительно выше, чем при напылении, так как при напылении деталь прогревается более равномерно. При шлифовании происходит более быстрое нагревание и охлаждение отдельных участков поверхности детали, при этом контактные температуры могут достигать 1000-1200°C [3]. Совокупность этих факторов создает благоприятные условия для формирования значительных температурных напряжений. Высокие контактные температуры образуют трещины, свидетельствующие о браке в напыленном слое. Для избежания образования трещин необходимо снизить контактную температуру, что можно достигнуть с применением СОЖ.

Постановка задачи: Задача состоит в расчете необходимого давления СОЖ, что создало бы дополнительные возможности управления качественными характеристиками поверхностного слоя детали при шлифовании.

При вращении шлифовального круга вокруг него циркулируют мощные воздушные потоки, отбрасывающие СОЖ и препятствующие проникновению ее в зону контакта круга с деталью [4]. Это явление связано не только с тем, что воздух выбрасывается через поры шлифовального круга, но и с определенными аэродинамическими закономерностями, присущими обтеканию воздухом вращающегося диска. При шлифовании в зоне контакта

круга с деталью давление воздуха может доходить до 2 МПа, в связи с чем создаются дополнительные препятствия для проникновения туда СОЖ. Однако, нет строгих теоретических или экспериментальных зависимостей, которые давали бы возможность связать величину давления воздуха с режимами шлифования и свойствами шлифовальных кругов, что позволило бы научно обоснованно рассчитать давление СОЖ.

Возле вращающегося шлифовального круга, даже если он изготовлен из непористого материала, всегда существует пограничный слой воздуха, вращающийся вместе со шлифовальным кругом и вовлекаемый в зону контакта круга с деталью [4]. Взаимодействие воздуха с кругом и с деталью в зоне контакта можно рассматривать исходя из следующих соображений.

Если рассмотреть пространство, заключенное между условной наружной поверхностью круга и условной поверхностью связки, то можно увидеть, что это пространство заполнено выступающими из связки зернами, между которыми находится воздух. Таким образом, между зернами шлифовального круга и его условными поверхностями имеются некоторые объемы воздуха. Во время резания обрабатываемого материала кругом зерна последнего частично будут углубляться в материал, а частично – в связку. Это приведет к тому, что расстояние между условными поверхностями уменьшится, а, следовательно, уменьшатся и объемы воздуха.

Кроме того, во время резания обрабатываемого материала зернами круга возникает высокая температура, происходит большое тепловыделение, в результате которого температура воздуха, заключенного между зернами должна повыситься.

Таким образом, при шлифовании воздух, проникший в зону контакта круга с деталью, подвергается одновременному сжатию и нагреву, в связи с чем в первом приближении можно применить уравнение Менделеева-Клапейрона состояния идеального газа [5]. В соответствии с этим уравнением давление воздуха будет:

$$P_{\epsilon} \approx \frac{RT}{V}, \quad (1)$$

где R – универсальная газовая постоянная, $R=8,31441$ Дж/(К·моль);

V – объем воздуха;

T – температура в °К.

Реальные газы с хорошим приближением подчиняются этому объединенному газовому закону лишь при малых плотностях, то есть при не слишком больших давлениях и высоких температурах.

Так как воздух – реальный газ, то давление воздуха в зоне контакта круга с деталью можно определить, используя уравнение Ван-дер-Ваальса состояния реального газа, которое имеет вид:

$$\left(P + a/V^2\right)(V - b) = RT, \quad (2)$$

где P – давление;

V – удельный объем газа;

T – абсолютная температура;

a и b – константы, $a=0,1350 \text{ м}^4\cdot\text{Н/моль}^2$, $b=38,620 \text{ см}^3/\text{моль}$.

Константа b определяет суммарный объем, занятый всеми молекулами газа вследствие конечности их размеров, а поправка a/V^2 – некоторое “внутреннее” давление, обусловленное взаимным притяжением молекул.

Повышение давления в связи со сжатием и повышением температуры воздуха может быть рассчитано по выражению:

$$P = \frac{4,9 \cdot \left(RT - 0,37 \frac{a}{V} + 0,49 \frac{ab}{V^2} \right)}{V - 1,3b}. \quad (3)$$

Как показывают результаты расчетов, наибольшие величины давления следует ожидать при шлифовании мягкими кругами М1-М2. Можно предположить, что в этом случае давление воздуха будет повышаться в большей степени, вследствие значительного уменьшения объемов между зернами из-за большого углубления зерен в мягкую связку. В диапазоне зернистостей М3, СМ1-СМ2, С1-С2 наблюдается определенное повышение давления. Можно допустить, что в этом случае большое влияние имеет эффект увеличения температуры при увеличении твердости круга.

Уменьшение зернистости круга приводит к уменьшению величины углубления зерна в связку, однако в это же время, в связи с уменьшением зернистости, происходит рост температуры шлифования, в результате чего увеличивается давление воздуха в зоне контакта круга с деталью, что согласуется с (3). Расчеты показывают также, что более напряженным режимам обработки соответствуют большие давления воздуха в зоне контакта круга с деталью.

Для целей математического моделирования тепловой поток, при охлаждении эмульсией, проникающей в зону контакта круга с деталью, рассчитывается исходя из известных термодинамических закономерностей конвективного теплообмена между нагретой поверхностью и охлаждающей жидкостью [5]. Тепловой поток, который переходит в деталь:

$$Q_2 = Q - Q_1, \quad (4)$$

где Q_2 – тепловой поток, поглощаемый деталью, Вт/м²;

Q – значение величины теплового потока при отсутствии СОЖ, Вт/м²;

Q_1 – часть теплового потока, переходящего в СОЖ, по закону конвективного теплообмена, Вт/м²;

$$Q_1 = F \cdot \alpha_1 \cdot \Delta T, \quad (5)$$

где F – площадь охлаждаемой поверхности ($F = \sqrt{Dt} \cdot s$), m^2 ;

a_1 – коэффициент теплоотдачи, c^{-1} ;

ΔT – разность температур между температурой нагретой поверхности и температурой СОЖ ($\Delta T = T - 20^\circ$), $^\circ C$;

T – температура поверхности при шлифовании без СОЖ, $^\circ C$.

Следовательно, тепловой поток, переходящий в деталь:

$$Q_2 = Q - \sqrt{Dt} \cdot s \cdot a_1 \cdot (T - 20^\circ). \quad (6)$$

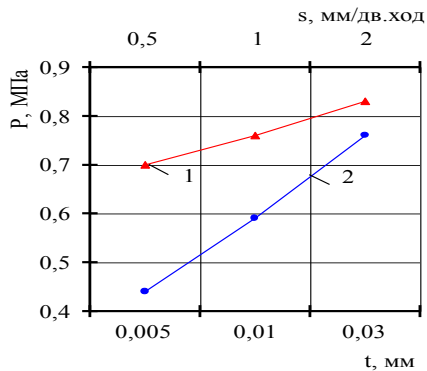
Экспериментальное исследование: Экспериментальные измерения [6] показали, что давление воздуха в зоне контакта круга с деталью зависит как от режимов обработки, так и от характеристик кругов. Максимальная величина давления, которая была зарегистрирована экспериментально, составляет 1,2 МПа. Величина давления повышается при увеличении твердости шлифовального круга. Эксперимент не подтвердил данных расчетов о том, что давление воздуха при шлифовании кругами М1-М2 имеет максимальную величину. Вероятное углубление зерен в связки разных твердостей в значительной степени выравнивается из-за податливости системы СПИД. Уменьшение зернистости приводит к росту давления. Увеличение режимов также способствует увеличению давления воздуха в зоне контакта круга с деталью.

Следовательно, подавая СОЖ в зону контакта шлифовального круга с деталью под давлением меньшим, равным или большим, чем давление воздуха в этой зоне в данный момент, можно получить различную степень проникновения туда СОЖ.

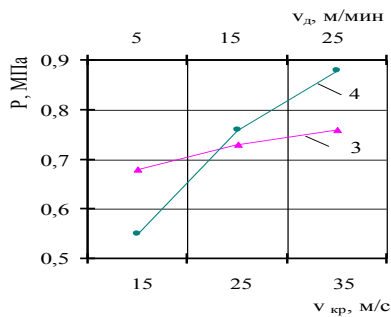
Давление СОЖ необходимо выбирать таким, чтобы оно было несколько больше, чем давление воздуха в контактной зоне. Как правило, СОЖ без труда проникает в зону контакта круга с деталью, когда ее давление на 10-15% выше, чем давление воздуха. Можно рассчитать такое давление СОЖ, которое обеспечивало бы гарантированное проникновение ее в зону контакта круга с деталью и максимальный охлаждающий эффект. Такая методика подачи СОЖ дает возможность снижать температуру шлифования до предельно допустимых значений.

Если при шлифовании без охлаждения или при шлифовании с охлаждением поливом величина температуры уменьшилась за счет засаливания круга, то при подаче СОЖ под давлением значения этой температуры практически не зависит от времени шлифования в связи с тем, что круг хорошо моется струей СОЖ и практически не засаливается.

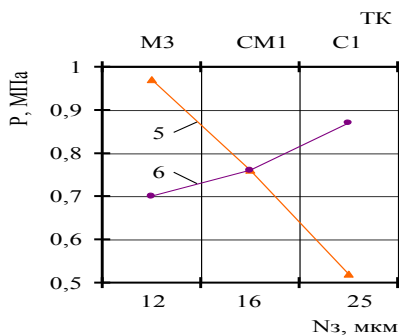
Математическое моделирование подачи СОЖ под давлением дало возможность установить зависимость давления воздуха в зоне контакта круга с деталью от изменения режимов шлифования (Рис. 1).



а)



б)



в)

Рис. 1. Зависимость давления воздуха в зоне контакта шлифовального круга (63С25СМ16К5) с деталью от: а – глубины резания (1) и поперечной подачи (2), б – скорости шлифовального круга (3) и скорости детали (4), в – зернистости шлифовального круга (5) и его твердости (6); $v_{кр}=35$ м/с, $v_{д}=15$ м/мин, $s=2$ мм/дв.ход, $t=0,01$ мм

Как видно из графиков, в диапазоне применяемых режимов шлифования напыленного слоя наибольшее значение давления составляет величину порядка 1 МПа. Следовательно, давление СОЖ, превышающее эту величину на 10-15%, обеспечит гарантированное проникновение СОЖ в зону контакта круга с деталью. Следует учитывать, что моделирование было проведено для наиболее неблагоприятного случая шлифования, кругами из карбида кремния зеленого, когда температура шлифования имеет наибольшие значения. При шлифовании электрокорундовыми и алмазными кругами температура поверхности будет ниже и соответственно будет ниже необходимое давление воздуха в зоне контакта круга с деталью. В таблице 1 показаны рекомендуемые значения давления подачи СОЖ для шлифования различными кругами.

Таблица 1 Рекомендуемые значения давления подачи СОЖ для шлифования различными кругами

№ пп	Шлифовальный круг	Давление воздуха в зоне контакта круга с деталью, Р, МПа
1	Электрокорунд белый	0,88
2	Карбид кремния зеленого	0,97
3	Алмазный круг	0,56

Эксперименты и математическое моделирование показали, что при подаче СОЖ под давлением температура и остаточные напряжения на поверхности детали и на границе покрытие-подложка значительно снижаются. Температура поверхности, остаточные напряжения на поверхности детали и на границе покрытие-подложка находятся в следующих пределах при шлифовании с использованием СОЖ кругами из:

- электрокорунда белого: $T_{c_n} = 350 \div 700^\circ\text{C}$, $G_{c_n} = 18 \div 85 \text{ МПа}$,

$$G_{c_{n-n}} = (-5) \div 45 \text{ МПа};$$

- карбида кремния зеленого: $T_{c_n} = 400 \div 800^\circ\text{C}$, $G_{c_n} = 25 \div 110 \text{ МПа}$,

$$G_{c_{n-n}} = 0 \div 55 \text{ МПа};$$

- алмазными кругами: $T_{c_n} = 200 \div 425^\circ\text{C}$, $G_{c_n} = (-15) \div 30 \text{ МПа}$,

$$G_{c_{n-n}} = (-35) \div 5 \text{ МПа}.$$

Выводы:

1. Давление СОЖ необходимо выбирать таким, чтобы оно было несколько больше, чем давление воздуха в контактной зоне. СОЖ без труда проникает в зону контакта круга с деталью, когда ее давление на 10-15% выше, чем давление воздуха, и обеспечивает максимальный охлаждающий

эффект. Такая методика подачи СОЖ дает возможность снижать температуру шлифования до предельно допустимых значений.

2. При подаче СОЖ под давлением температура и остаточные напряжения на поверхности детали и на границе покрытие-подложка значительно снижаются. Математическое моделирование подачи СОЖ под давлением дало возможность установить зависимость давления воздуха в зоне контакта круга с деталью от изменения режимов шлифования. Показаны рекомендуемые значения давления подачи СОЖ для шлифования различными кругами.

3. Определены температура поверхности, остаточные напряжения на поверхности детали и на границе покрытие-подложка при шлифовании различными кругами с использованием СОЖ.

Список использованных источников: 1. Кремень З.И. Технология шлифования в машиностроении [Текст] / Кремень З.И., Юрьев В.Г., Бабошкин, А.Ф. – СПб: Политехника. – 2015. – С. 424. 2. Корчак С.Н. Теория обрабатываемости сталей и сплавов при абразивной обработке /С.Н. Корчак //Вестник южно-уральского гос. ун-та.: Сб. науч. трудов (Серия «Машиностроение»). – 2003. –№9. Вып.4. – С.82 – 90. 3. Усов А.В. Современное состояние исследований термомеханических процессов при шлифовании /А.В. Усов, Э. Донеv //Труды Одесск. политехн. ун-та: науч. и призм.-практ. сб. – Одесса: ОНПУ, 2001. – Вып.5.–С.22 – 27. 4. Мельникова Е.П. Влияние технологических факторов финишной абразивной обработки на качество поверхности / Е.П.Мельникова // Технология машиностроения. – 2003. –№3. – С.13 – 16. 5. Крайнов А.Ю. Основы теплопередачи. Теплопередача через слой вещества: учеб. пособие [Текст] / Крайнов А.Ю. – Томск: SST – 2016 – С. 48. 6. Лебедев В.Г. Механизм образования прижогов при шлифовании деталей из закаленных сталей /В.Г. Лебедев, Н.Н. Клименко, С.А. Аль-Аджелам //Наукові нотатки: Міжвузів. зб. (за напрямком «Інженерна механіка») – Луцк: ЛДТУ, 2013. Вип. 40. – С. 141 – 144.

Bibliography (transliterated): 1. Kremen Z.I. Tehnologiya shlifovaniya v mashinostroenii [Tekst] / Kremen Z.I., Yurev V.G., Baboshkin, A.F. – SPb: Politehnika. – 2015. – S. 424. 2. Korchak S.N. Teoriya obrabatyvaemosti stalei i splavov pri abrazivnoj obrabotke /S.N. Korchak //Vestnik yuzhno-uralskogo gos. un-ta.: Sb. nauch. trudov (Seriya «Mashinostroenie»). – 2003. –№9. Vyp.4. – S.82 – 90. 3. Usov A.V. Sovremennoe sostoyanie issledovaniy termomekhanicheskikh processov pri shlifovanii /A.V. Usov, E. Donev //Trudy Odessk. politehn. un-ta: nauch. i prizv.-prakt. sb. – Odessa: ONPU, 2001. – Vyp.5.–S.22 – 27. 4. Melnikova E.P. Vliyaniye tehnologicheskikh faktorov finishnoy abrazivnoy obrabotki na kachestvo poverhnosti / E.P.Melnikova // Tehnologiya mashinostroeniya. – 2003. –№3. – S.13 – 16. 5. Krajnov A.Yu. Osnovy teploperedachi. Teploperedacha cherez sloj veshstva: ucheb. posobie [Tekst] / Krajnov A.Yu. – Tomsk: SST – 2016 – S. 48. 6. Lebedev V.G. Mehanizm obrazovaniya prizhогоv pri shlifovanii detalei iz zakalennyh stalei /V.G. Lebedev, N.N. Klimenko, S.A. Al-Adzhelam //Naukovi notatki: Mizhvuziv. zb. (za napryamkom «Inzhenerna mehanika») – Luck: LDTU, 2013. Vip. 40. – S. 141 – 144.

Надійшла до редколегії 25.06.2018

СОДЕРЖАНИЕ

Клименко С.А. Старатель и светитель технологической наследственности (к 90-летию со дня рождения Э.В. Рыжова)	3
Алексенко Б.А., Доброворський С.С., Добровольська Л.Г. Вплив внутрішнього дисектора на рівномірність розподілу енергії НВЧ випромінювання в процесі регенерації адсорбентів в промислових осушувачах	8
Беспалова А. В., Лебедев В. Г., Фроленкова О.В., Чумаченко Т.В. Разрезание каменных строительных материалов и керамической плитки при строительных работах алмазными дисками	16
Верещак А.А. Исследование процесса осаждения и эксплуатационных свойств многослойно-композиционного наноструктурированного покрытия Ti-TiN-(Ti,Al,Si)N.	29
Гаращенко Я.Н. Возможности визуального и статистического анализа для оценки применимости декомпозиции изделия при его послойном изготовлении.....	44
Гусарев В.С., Наддачин В.Б. Структурная схема автоматического монтажа	54
Гуцаленко Ю.Г. Алмазно-искровое шлифование: обзор исследовательской и промышленной практики разработки харьковской научной школы физики процессов резания и интегрированных технологий машиностроения	63
Іванов В.О., Ляпощенко О.О., Павленко І.В. Класифікації опорних елементів модульних верстатних пристроїв	79
Карник Р.Т., Дідик С.В. Автоматизація процесу проектування прес-форм для литва термопластів під тиском	91
Манохин А. С., Столбовой В.А., Закиев И. М., Клименко С. А., Береснев В. М., Клименко С. Ан., Найдено А.Г., Закиев В. И., Мельничук Ю.А., Копейкина М. Ю. Влияние подготовки режущих пластин из рсbn под напыление на адгезионную прочность в системе «покрытие-основа» и эксплуатационные характеристики инструмента	98
Новиков Ф. В., Гуцаленко Ю. Г., Рябенков И. А. Прогрессивные направления высокопроизводительной и высококачественной обработки металлов резанием	110

Полянский В. И. Математическая модель теплового процесса при шлифовании материалов	120
Сінковський А.С., Янюк М.Ф., Рибак О.В. Високотемпературні теплоізоляційні матеріали на основі віскерів карбіду кремнію, вирощених методом хімічних транспортних реакцій	131
Тигарев В.М., Тонконогий В.М., Гончаренко А.А. Общий подход к проектированию параметрической модели конструкции рамы электроскутера и симуляции нагрузок в САПР Inventor	139
Тонконогий В.М., Сінько І.С., Замятін М.І., Ланова Д.Д., Панченко А.О. Проектування та розробка програми для виготовлення ювілейної медалі до 100-річчя ОНПУ	150
Тонконогий В.М., Сінько І.С., Махиянова Э.А., Миткова А.Ю. Математическая модель проектирования помещений с акустическими свойствами	158
Усов А.В., Куницын М.В. Возможности повышения эксплуатационных характеристик рабочих поверхностей цилиндров технологическими методами	168
Федорович В.А., Островерх Е.В., Козакова Н.В. Методология компьютерного моделирования процесса алмазного выглаживания	177
Chupryna V.M. The spatial rigidity of technological robots (Просторова жорсткість технологічних роботів).....	190
Шелковий О.М., Фадєєв В.А., Набока О.В. Підвищення ефективності зборки складних машинобудівних виробів на засадах інтеграції механоскладальних операцій	195
Якимов А.А., Клименко Н.Н., Шихирева Ю.В., Бовнегра Л.В. Обеспечение качества поверхности при шлифовании деталей с композиционным покрытием	206

Наукове видання

Високі технології в машинобудуванні

Збірник наукових праць

Упорядник *проф. Шелковий О.М.*

Відповідальний за випуск проф. І.М. Пижов

Матеріали відтворено з авторських оригіналів

Підп. до друку 28.08.2018. Формат 60х84 1/16. Папір СоруПарег.
Друк - ризографія. Гарнитура Тайме. Умов. друк. арк. 10,0.
Облік. вид. арк. 11,0. Наклад 300 прим. 1-й завод 1-100. Зам. № 1149
Ціна договірна.

Видавничий центр НТУ «ХПІ»
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 116 від 10.07.2000 р.
61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

Надруковано у ТОВ «Смугаста типографія»
61002, м. Харків, вул. Чернишевська, 28А
Тел.: (057) 754-49-42
e-mail: zebra-zakaz@mail.ru