

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
«ХАРЬКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»

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

**РЕЗАНИЕ
И
ИНСТРУМЕНТЫ
В технологических системах**

**CUTTING & TOOLS
IN TECHNOLOGICAL SYSTEMS**

**Международный научно-технический сборник
International Scientific-Technical Collection**

**Основан в 1966 г. М. Ф. Семко
Found by M. F. Semko in 1966**

**ВЫПУСК 88
Edition № 88**

Харьков НТУ «ХПИ» – 2018 – Kharkiv NTU «KhPI»

УДК 621.91
ББК 34.63
Р34

Державне видання
Свідоцтво Державного комітету телебачення і радіомовлення України
КВ № 7840 від 8 вересня 2003 року
Друкується за рішенням Вченої Ради НТУ «ХПІ»
(протокол № від . 2018 р.)

Редакционная коллегия:

*А. И. Грабченко, д.т.н. (отв. ред.), М. Д. Узунян, д.т.н. (зам. отв. ред.),
Азу Коллинз Азу, PhD, Н. В. Верезуб, д.т.н., Ю. Н. Внуков, д.т.н.,
В. Л. Доброскок, д.т.н., М. Кавалец, проф., Я. Кундрак, д.т.н.,
П. П. Мельничук, д.т.н., В. К. Старков, д.т.н., Р. С. Турманидзе, д.т.н.,
В. А. Фадеев, проф., В. А. Федорович, д.т.н., М. Хорват, д.т.н.,
Шаилendra Кумар Джсха, PhD, Ф. Я. Якубов, д.т.н.,
Н. В. Крюкова (отв. секр.)*

Адрес редакционной коллегии: 61002, Харьков, ул. Кирпичова, 2,
Национальный технический университет «Харьковский политехнический
институт», кафедра «Интегрированные технологии машиностроения»
им. М.Ф. Семко, тел. +38 (057) 706-41-43.

*В апреле 2013 г. научный сборник «Резание и инструменты в
технологических системах» включен в справочник периодических изданий
базы данных Ullrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA)*

Р34 Резание и инструменты в технологических системах:
Международ. науч.-техн. сб. / редкол.: А. И. Грабченко (отв. ред.). –
Харьков : НТУ «ХПИ», 2018. – Вып. 88. – 267 с.

В збірці представлені наукові статті, в яких розглядаються актуальні питання в області механічної обробки різноманітних сучасних матеріалів з використанням високопродуктивних технологій, нових методів, вимірювальних приладів для контролю якості оброблених поверхонь і високоефективних різальних інструментів. Розкриваються аспекти оптимізації та математичного моделювання на різних етапах технологічного процесу.

Для інженерів та наукових співробітників, що працюють у галузі різання матеріалів, проектування різальних інструментів у технологічних системах.

УДК 621.91
ББК 34.63

© НТУ «ХПИ», 2018

УДК 621.91

Агу Коллинз Агу, д-р философии в технике, Абуджа, Нигерия,
М. Д. Узунян, д-р техн. наук, Харьков, Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ ОПТИМАЛЬНОГО СОСТАВА ТВЁРДОГО СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА ПРИ АЛМАЗНО- ИСКРОВОМ ШЛИФОВАНИИ ТВЁРДЫХ СПЛАВОВ

Представлені результати досліджень оптимального варіанту твердого мастильного матеріалу при алмазно-іскровому шліфуванні твердих сплавів. Показано, що використання спеціального складу мастила замість рідини поливом за рахунок адсорбційного ефекту забезпечує зниження вільної поверхневої енергії, викликаючи зниження крихкої міцності твердих сплавів і роботу диспергування.

Ключові слова: алмазно-іскрове шліфування, твердий мастильний матеріал

Представлены результаты исследований оптимального варианта твёрдого смазочного материала при алмазно-искровом шлифовании твёрдых сплавов. Показано, что использование специального состава смазки вместо жидкости поливом за счёт адсорбционного эффекта обеспечивает понижение свободной поверхностной энергии, вызывая снижение хрупкой прочности твёрдых сплавов и работу диспергирования.

Ключевые слова: алмазно-искровое шлифование, твёрдый смазочный материал

The results of studies of the optimal version of a solid lubricant for diamond-spark grinding of hard alloys are presented. It is shown that the use of a special lubricant composition instead of a liquid by irrigation due to the adsorption effect provides a reduction in free surface energy, causing a decrease in the brittle strength of hard alloys and dispersion work.

Keywords: diamond-spark grinding, solid lubricant

При исследовании и анализе оптимального варианта твёрдого смазочного материала (ТСМ) из различных компонентов использовались стеариновая кислота (стеарин), себациновая кислота, имеющая большую, чем стеарин температуру каплеобразования ($T = 134\text{ }^{\circ}\text{C}$) и их смесь в сравнении с традиционными СОТС струйным поливом, представляющими 3%-ный содовый раствор воды.

Эксперименты проводились в одинаковых режимных условиях алмазно-искрового шлифования (АИШ) кругом 12A2-45 $^{\circ}$ AC6-100/80 M1-01-4 при шлифовании твердосплавных пластин Т15К6 сечением 18×16×6.

Сравнительная оценка результатов анализа производилась по критериям производительности (Q , мм³/мин), относительному расходу алмазов (q , мг/г), удельной себестоимости ($C_{ш}$, коп/см³) и представлена в табл. 1.

На основании анализа результатов экспериментов с различными диэлектрическими средами установлено, что использование смеси равных

частей стеарина и себаценовой кислоты можно считать наиболее целесообразным, т.к. при этом обеспечиваются при большей производительности сравнительно меньшие значения удельной себестоимости и относительного расхода алмазов. Поэтому особенности взаимодействия алмазных кругов с обрабатываемым твёрдым сплавом при АИШ изучались с минимально подаваемой в зону резания сухой смазкой выявленного состава.

Таблица 1 – Значения показателей работоспособности алмазных кругов при различных диэлектрических средах

Диэлектрическая среда	Производительность Q , мм ³ /мин	Относительный расход алмазов q , мг/г	Удельная себестоимость $C_{ш}$, коп/см ³
СОТС, струйный полив	549,8	1,76	6,92
Стеарин	567,4	1,63	6,41
Себаценовая кислота	525,7	1,87	7,63
Смесь равных частей стеарина и себаценовой кислоты	638,3	1,32	6,04

Предлагаемый к применению ТСМ является экологически безопасным средством. В его состав не входят традиционные для большинства СОТС серу-, хлор- и фосфорсодержащие противозадирно-противоизносные присадки, которые в результате термомеханической деструкции разлагаются в зоне резания с выделением в окружающую среду токсичных производных веществ, содержащихся в указанных присадках.

Выбор энергии искровых разрядов для АИШ твёрдого сплава при применении установленного состава диэлектрической среды из твёрдого смазочного материала производился из условия обеспечения минимальной удельной себестоимости шлифования. При этом фиксировались также производительность и относительный расход алмазов. Электрические параметры варьировались в широких пределах путём изменения частоты импульсов f с подсчётом времени действия единичного импульса и энергии разряда.

Результаты подсчёта отмеченных параметров и показатели работоспособности кругов представлены в табл. 2.

При этом средние значения силы тока и напряжения составляли соответственно $I_{cp} = 5 \text{ A}$, $U_{cp} = 40 \text{ В}$; в качестве оптимального было принято значение скважности $n_{скв} = 2$.

Зависимость удельной себестоимости шлифования твёрдого сплава от частоты импульсов и соответственно вводимой энергии имеет экстремальный характер. Он связан с различным влиянием энергии единичных разрядов на производительность процесса и износ алмазного круга. В диапазоне частот от 22 до 66 кГц износ уменьшается в 1,6 раза, а производительность – в 1,1 раза.

Таблица 2 – Значение показателей работоспособности алмазных кругов для различных электрических параметров

Частота следования импульсов f , кГц	Время действия единичного импульса τ , мкс	Энергия единичного разряда W , Дж·10 ⁻⁴	Производительность шлифования Q , мм ³ /мин	Относительный расход алмазов q , мг/г	Себестоимость шлифования $C_{ш}$, коп/см ³
22	22,7	45,4	723,4	2,27	6,84
44	11,4	22,8	670,3	1,86	6,23
66	7,6	15,2	645,6	1,45	5,83
88	5,7	11,4	638,7	1,32	6,04

Более интенсивное уменьшение износа по сравнению с производительностью приводит к снижению удельной себестоимости шлифования до частоты 66 кГц. Дальнейшее повышение частоты импульсов свыше 66 кГц ($W < 15,2 \cdot 10^{-4}$ Дж) вызывает преобладающее уменьшение производительности по сравнению с износом круга. В результате полученного соотношения показателей процесса отмечается повышение удельной себестоимости шлифования.

Таким образом, в результате анализа переменных электрических параметров алмазного электроэрозионного шлифования обоснован выбор и определены его электрические характеристики ($f = 66 \text{ кГц}$, $n_{скв} = 2$, $W = 15,2 \cdot 10^{-4}$ Дж, $\tau = 7,6 \text{ мкс}$), которые обеспечивают высокую работоспособность алмазных кругов в процессе АИШ с применением ТСМ при наименьших затратах на его осуществление.

Сравнительные особенности физико-механического взаимодействия режущей поверхности алмазных кругов с обрабатываемым материалом при АИШ поливом СОТС и с применением ТСМ по технологии минимальной смазки исследовались с помощью коэффициентов шлифования ($K_{ш}$) и энергоёмкости процесса (B_m).

Коэффициент шлифования оценивался как отношение тангенциальной силы P_z к радиальной P_y , а удельная энергоёмкость определялась энергией (работой), затраченной на съём массы твёрдого сплава в единицу времени. Работа шлифования подсчитывалась как произведение силы P_z и скорости резания V ; усилие резания измерялось с помощью специального динамометра по упругой схеме шлифования.

Изучалось влияние различных факторов, а значит и различных условий контактного взаимодействия рабочей поверхности алмазного круга со шлифуемой поверхностью твёрдого тела.

Влияние нормального давления на $K_{ш}$ представлено на рис. 1.

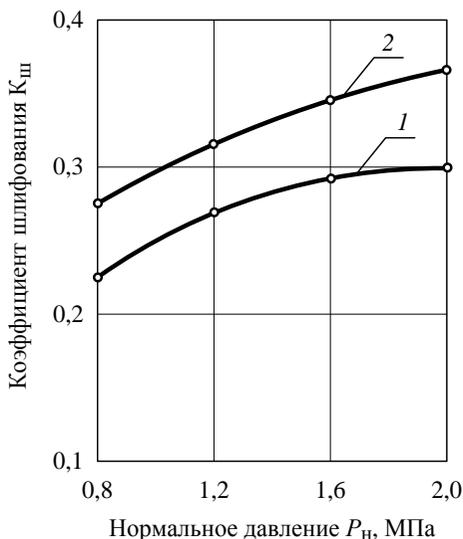


Рисунок 1 – Влияние нормального давления на коэффициент шлифования:

1 – сухая смазка; 2 – СОТС поливом

Условия шлифования: $V = 25$ м/с; круг 12A2-45°AC6-100/80 M1-01-4

Увеличение нормального давления вызывает рост коэффициентов шлифования для обоих способов шлифования. Активный режущий рельеф алмазного круга при АИШ обеспечивает хороший уровень внедряемости микрокромки алмазных зёрен в обрабатываемую поверхность твёрдого сплава, что способствует опережающему росту тангенциальной силы; это можно считать главным фактором, определяющим характер зависимостей.

Кроме того, из графиков следует, что для способа шлифования с ТСМ значения коэффициентов шлифования меньше во всем диапазоне увеличения нормальных давлений. Это объясняется меньшим вкладом доли коэффициента трения между металлической связкой алмазного круга и твердым сплавом в общее значение коэффициента шлифования.

Зависимость $K_{ш}$ от скорости шлифования для разных технологических сред в зоне резания характеризуется его практически незначительным ростом; при этом значение $K_{ш}$ во всем диапазоне изменения V от 15 до 35 м/сек заметно меньше при шлифовании с ТСМ.

Изменение зернистости в диапазоне от 50/40 до 160/125 незначительно влияет на изменение $K_{ш}$ в отличие от обычного алмазного шлифования; при этом для процесса с ТСМ его значение несколько ниже.

Незначительное влияние зернистости алмазных кругов при АИШ твёрдых сплавов можно объяснить как развитостью режущего рельефа, так и образованием микрокромки на поверхности более крупных и менее прочных зёрен, что в какой-то степени нивелирует количественный фактор (число микрокромки) мелкозернистых кругов.

Влияние концентрации алмазов на $K_{ш}$ более заметно, чем влияние зернистости, но каких-либо особенностей не выявляет; общее объяснение можно свести к традиционному количественному фактору, незначительным увеличением сил резания и суммарного сечения среза.

Кроме изложенных результатов экспериментов, объясняющих характер зависимостей, можно сделать общий вывод, что значения $K_{ш}$ при АИШ твёрдых сплавов с сухой смазкой меньше, чем при обычном шлифовании с СОТС поливом, а значит меньше и напряжённость процесса шлифования.

Результаты экспериментов по влиянию нормального давления на энергоёмкость процесса АИШ представлены в табл. 3. Во всём диапазоне изменения нормальных давлений значения B_m меньше для ТСМ по сравнению с СОТС поливом. Общая тенденция незначительного изменения показателя энергоёмкости при увеличении нормального давления объясняется соответственно пропорциональным ростом производительности шлифования.

Таблица 3 – Влияние нормального давления на удельную энергоёмкость B_m , Дж/г·10³ при АИШ Т15К6

Диэлектрическая среда	Нормальное давление P_n , МПа			
	0,8	1,2	1,6	2,0
СОТС, струйный полив	5,5	5,4	5,2	5,3
ТСМ	4,6	4,4	4,5	4,7

Изменение скорости резания характеризуется более выраженным влиянием её на B_m , чем нормальное давление (рис. 2). С увеличением скорости B_m растёт как при шлифовании с СОТС поливом, так и при использовании ТСМ; при этом интенсивность роста удельной энергоёмкости при шлифовании с введением в зону резания ТСМ значительно меньше, что можно объяснить более активной самозатачиваемостью режущего рельефа алмазного круга и соответственно большим съёмом материала.

Возможности использования ТСМ наиболее эффективно проявляются при АИШ твёрдого сплава совместно со стальной державкой, т.к. при этом с одной стороны более полно будут активироваться процессы, связанные с образованием новых поверхностей (эффект Ребиндера), а с другой – адсорбционно связанная с обрабатываемой поверхностью граничная пленка надёжно экранирует трущиеся поверхности.

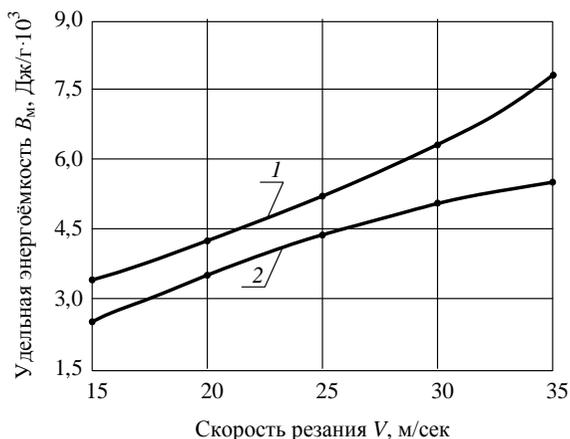


Рисунок 2 – Влияние скорости резания на энергоёмкость при АИШ:
1 – СОТС струйным поливом; 2 – ТСМ

Условия шлифования: $P_n = 1,2$ МПа ; круг 12А2-45°АС6-100/80 М1-01-4;
обрабатываемый материал Т15К6

Последнее обстоятельство будет нивелировать диффузионное взаимодействие поверхности алмазных зёрен со сталью в связи с известными положениями о сродстве контактирующих материалов и перепаде концентраций углерода в них, что вызывает повышенный износ кругов.

Выявленное преимущество шлифования твёрдых сплавов, в том числе и композиции «твёрдый сплав–сталь» с применением ТСМ объясняется специфическим механизмом воздействия смазочной среды на адсорбируемые поверхности обрабатываемых материалов. Высокие локальные температуры при АИШ вызывают деструкцию среды, обеспечивают дозированный (без избытка) постоянный приток (присутствие) групп легкоподвижных атомов из карбоксильной составляющей и углеводородных радикалов поверхностно-активного компонента в зоне резания.

Массовое микрорезание – царапание при алмазном шлифовании сопровождается совокупностью условий для проявления эффекта Ребиндера. Высокие локальные напряжения и скорости воздействия, циклический характер нагрузки, весьма малый съём материала за один контакт (проход) алмазного зерна, в результате чего атомы активной среды должны преодолеть лишь небольшой путь к зоне разрушения, к истокам образующейся опережающей микротрещины, обеспечивая надёжное смачивание обнажаемой ювенильной поверхности – все это способствует физической и химической адсорбции, а также смазывающему действию среды ТСМ.

Следует отметить, что согласно известному критерию Гриффитса, при хрупком разрушении прочность пропорциональна корню квадратному из величины поверхностной энергии. В соответствии с этим, понижению прочности в несколько раз должно отвечать понижение свободной поверхностной энергии, примерно на порядок. Поэтому, если ТСМ в связи с иницированием адсорбционных эффектов вызывает понижение свободной поверхностной энергии, то, естественно, должна уменьшаться хрупкая прочность твёрдых сплавов и работа диспергирования. Именно поэтому при АИШ с ТСМ по сравнению с СОТС поливом имеют место более низкие значения удельной работы резания, особенно при повышенных нормальных давлениях и скоростях шлифования.

Таким образом, можно считать, что применение твёрдого смазочного материала, представляющего смесь равных частей стеариновой и себациновой кислот (ТСМ), по сравнению с СОТС поливом при использовании в условиях АИШ является весьма перспективным направлением, отвечающим современным тенденциям развития технологии минимальной смазки.

Результаты исследований состояния режущей поверхности алмазных кругов и зёрен, фрагменты износа, которые изучались с помощью электронного сканирующего микроскопа Jeol-JSM-50 после АИШ с применением ТСМ.

Анализ микрофотографий режущей поверхности алмазных кругов после электронно-микроскопических исследований позволяет заключить, что различные участки рельефа и алмазных зёрен подвержены различным видам воздействия и износа: режущая поверхность развита; разновысотность алмазных зёрен обеспечивается; обнаруживаются хрупкие разрушения, скалывание отдельных элементов, усталостный характер износа; можно заключить, что режущий рельеф алмазного круга при АИШ с ТСМ не обнаруживает системного характера износа.

Список использованной литературы: 1. *Шукин Е. Д.* Физико-химические основы новых методов интенсификации обработки твердых тел / Е. Д. Шукин // Ежегодник «Физическая химия. Современные проблемы». – М. : Химия, 1983. – С. 30–40. 2. Пат 58078 Україна, МПК (2011.01) В24В 1/10. Твердый змашувальний матеріал для комбінованої обробки матеріалів струмопровідним абразивним інструментом / *Узунян М.Д., Піжов І.М., Агу Коллінз Агу*; власник Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». – № и 2010 11928; заявл. 08.10.2010; опубл. 25.03.2011. Бюл. №6. 3. *Узунян М. Д.* Алмазно-искровое шлифование твердых сплавов / М. Д. Узунян. – Х. : НТУ «ХПИ», 2003. – 359 с.

Bibliography (transliterated): 1. *Shhukin E. D.* Fiziko-himicheskie osnovy novykh metodov intensifikacii obrabotki tverdyh tel / *Ezhegodnik «Fizicheskaja himija. Sovremennye problemy».* – М. : Himija, 1983. – S. 30-40. 2. Pat 58078 Ukraina, MPK (2011.01) V24V 1/10. Tverdij zماشhуval'nij material dlja kombinovanoj obrobki materialiv strumoprovodnim abrazivnim instrumentom / *Uzunjan M.D., Pizhov I.M., Agu Kollinz Agu*; vlasnik Nacional'nij tehničnij universitet «Harkivs'kij politehničnij institut». – № i 2010 11928; zajavl. 08.10.2010; opubl. 25.03.2011. Bjul. №6. 3. *Uzunjan M. D.* Almazno-iskrovoe shlifovanie tverdyh splavov. – Н. : NTU «НПІ», 2003. – 359 s.

УДК 681.51:621.9.048

В. С. Антонюк, д-р техн. наук, Київ, Україна,
Р. П. Гайдаш, С. О. Білокін, канд. техн. наук,
Ю.Ю. Бондаренко, канд. техн. наук, М.О. Бондаренко, канд. техн. наук,
Черкаси, Україна

МОДИФІКАЦІЯ НАНОРЕЛЬЄФУ МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОЇ МІКРООБРОБКИ

Представлені результати мікрообробки електронним променем стрічкової форми поверхонь оптичних стекел К8, К108 з початковим нанорельєфом поверхні 15-22 нм після промислового шліфування та полірування. За результатами досліджень із застосуванням атомно-силової мікроскопії встановлено, що після електронно-променевої мікрообробки нанорельєф зменшився до значень 1,5...2,2 нм, що задовольняє вимогам до поверхонь оптичних інтегральних схем.

Ключові слова: електронно-променева мікрообробка, оптичне скло, атомно-силовий мікроскоп

Представлены результаты микрообработки электронным лучом ленточной формы поверхностей оптических стекел К8, К108 с начальным нанорельефом поверхностей 15...22 нм после промышленной шлифовки и полировки. По результатам исследований с применением атомно-силовой микроскопии установлено, что после электронно-лучевой микрообработки нанорельеф уменьшился до значений 1,5-2,2 нм, удовлетворяя требованиям к поверхностям оптических интегральных схем.

Ключевые слова: электронно-лучевая микрообработка, оптическое стекло, атомно-силовой микроскоп

The article represents the results of ribbon beam electron ray micromachining of optical glasses K8 and K108 surfaces with the initial nanorelief surface of 15-22 nm after the industrial grinding and polishing. After the application of atomic force microscopy, it was investigated that a nanorelief diminished to the values of 1,5...2,2 nm after a micromachining. This fulfills the requirements to the board surfaces of the optical integrated schemes.

Keywords: electron-beam micromachining, optical glass; atomic force microscope

Актуальність. Для виготовлення оптичних інтегральних схем (ОІС) та формування мікроелементів необхідного розміру та профілю на цих схемах, за останні десятиліття випробувані усі відомі матеріали аморфної, кристалічної, полікристалічної структури, а для їх поверхневої обробки використовувалися різні методи, у тому числі: промислові методи глибокого шліфування та полірування, загального шліфування і полірування, тощо.

Як показали дослідження, сучасним українським оптичним виробництвом не гарантується отримання на оптичному склі поверхонь, що задовольняли би вимогам, які висуваються до плат ОІС. При цьому, нанорельєф на промислово виготовлених пластинах перевищує величину у 5 нм, чим обмежує їх подальше використання в якості плат ОІС.

А вплив на поверхню оптичного матеріалу абразиву, миючих та

травильних розчинів на стадіях шліфування та полірування неминуче призводить до утворення хімічно-неоднорідного дефектного і тріщинуватого шарів, сукупна глибина яких може перевищувати десяті долі мікрметрів. Це, у багатьох випадках обмежує використання технологій електронної літографії та фотолітографії.

Проблема дотримання необхідного рівня нанорельєфу поверхневого шару оптичних матеріалів при виготовленні елементів нового покоління, підвищення продуктивності їх виготовлення є однією з найбільш актуальних в техніці та технології обробки оптичних матеріалів.

Одним із шляхів подолання цієї проблеми, є залучення нових інструментів для енергетичної мікрообробки оптичних поверхонь, у тому числі, і концентрованих потоків електронів.

Ефективність поверхневої обробки оптичного скла стрічковим електронним потоком вперше була показана в роботах В.М.Лісоченка [1].

В роботах [2, 3] показана можливість гнучкого керування процесом електронно-променевої обробки оптичного скла і оптичної кераміки шляхом оплавлення поверхні на глибину до 200 мкм. Авторами [4-6] підтверджена ефективність використання стрічкового електронного потоку при поверхневій обробці як оптичного, так і технічного скла.

Разом з тим, питання якісних змін нанорельєфу та дефектного шару оптичного скла силікатної групи від дії низькоенергетичного електронного потоку ($E \leq 6$ кеВ) вивченими недостатньо та не встановлено взаємозв'язок між цими змінами і параметрами електронно-променевої мікрообробки.

Тому, **метою роботи** є визначення змін нанорельєфу поверхні оптичного скла від впливу низькоенергетичного електронного потоку та встановлення взаємозв'язку між розміром модифікованого нанорельєфу та параметрами електронно-променевої мікрообробки.

Методика проведення експерименту. Об'єкти, які оброблені електронним променем: плоскопаралельні диски (діаметром 20 мм, товщиною 2; 4; 6 мм) із скла оптичного безкольорового марок К8, К108 (ГОСТ 3514-76).

Дослідження об'єктів обробки здійснювалось із застосуванням наступних приладів і матеріалів: атомно-силовий мікроскоп (АСМ) "NT-206V" (виробник "Микротестмашины", м.Гомель, Білорусь) пінцет, ексикатор, шафа пилозахисна ШЗА, спирт етиловий, бязь технічна. Для візуалізації об'єкта дослідження при збільшенні до 100 разів використано оптичну камеру "Logitech", поле огляду якої становить $1 \times 0,75$ мм².

Схеми отримання нанорельєфу поверхні із застосуванням атомно-силовий мікроскопа при безконтактній (а) та при контактній (б) схемах роботи представлено на рис. 1.

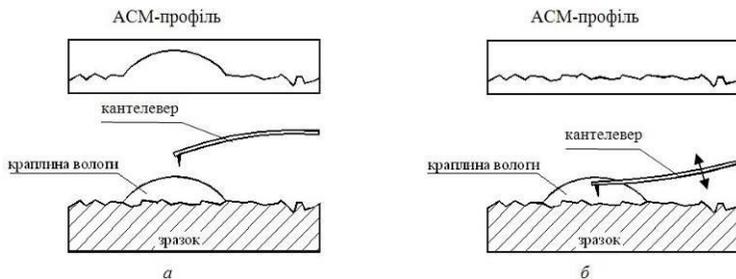


Рисунок 1 – Отримувані профілі поверхонь при безконтактній (а) та при контактній (б) схемах роботи атомно-силовий мікроскопа

Чутливим елементом мікроскопу є контелевер, відхилення якого при контакті з поверхнею визначається за допомогою лазерного променя. Позиціонування вимірюваної поверхні під контелевером здійснюється за допомогою високоточних крокових двигунів (у площині Х-У з кроком 2,5 мкм, вздовж осі Z з кроком 200 нм).

Профіль досліджуваної поверхні визначається шляхом сканування контелевера у площині Х-У на ділянці розміром 13×13 мкм з допомогою п'єзокерамічного сканера з кроком до 1 нм. Переміщення контелевера у вертикальній осі здійснюється п'єзотрубкою з кроком 0,02 нм у діапазоні 3 мкм. Одержання зображення мікрорельєфу оптичної поверхні проводили із застосування наступних режимів роботи АСМ: статичного (контактного), рис. 1,а та динамічного (безконтактного), рис. 1,б.

В динамічному режимі на контелевер накладаються коливання у вертикальній вісі з частотою від 10 Гц до 400 кГц. Головними перевагами даного режиму є значно підвищена чутливість вимірювальної системи (теоретично можливо досягти атомарної точності) та забезпечення механічної цілісності зонду та зразка.

На рис. 2. представлено зображення ділянки поверхні оптичного скла К8 з розташованою над нею вимірювальною системою з контелеверами для настроювання системи позиціонування АСМ.

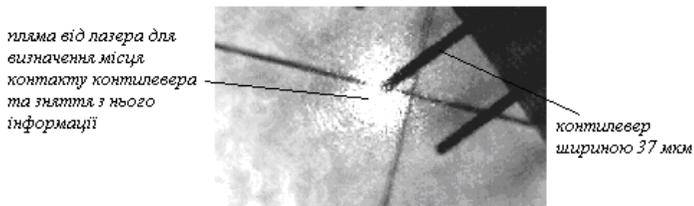


Рисунок 2 – Поверхня скла К8 з нанесеною за допомогою механічного різця сіткою (на знімку – перехрестя), NT-206V

Позиціонування кантелевера над поверхнею оптичного скла та подальше настроювання системи лазерний промінь – кантелевер відбувається у ручному режимі за допомогою вбудованої в пристрій АСМ довгофокусувальної камери „Logitech” з виведенням збільшеного у 150 разів зображення на дисплей ПК.

Як видно з рис. 2, правильне позиціонування кантелевера, що забезпечує найбільш повне та точне зняття інформації чутливою системою АСМ про топологію поверхні досягається при фокусуванні лазера фотодетектуючого пристрою на верхньому краю кантелевера.

Процес сканування завершується автоматично, після чого на моніторі комп’ютера отримували зображення поверхні. Для обробки та аналізу даних з мікрорельєфу використовували програма Surface v.6.2, що надає такі види інформації: тривимірна візуалізація поверхні; профілювання поверхні у необхідному перерізі; розподіл висот поверхні; кутова гістограма.

Середній час підготовки до роботи та сканування одного зразка складає 10...12 хвилин.

Використання методу атомно-силової мікроскопії дало можливість дослідити модифіковані електронним потоком поверхню та поверхневий шар скла К8 (рис. 3).

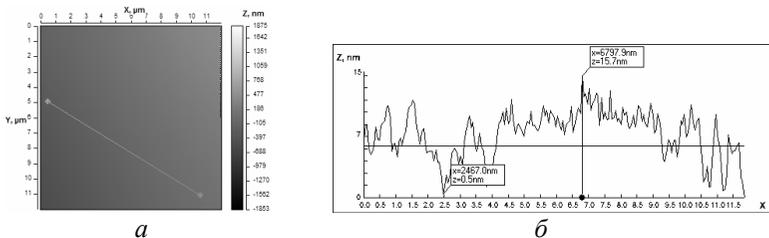


Рисунок 3 – Зовнішній вигляд (а) та нанорельєф вздовж лінії АВ (б) площадки поверхні (12×12 мкм) пластини із скла К8

із вплавленою електронним потоком металеву тонкою плівкою алюмінію

Результати експерименту та їх обговорення. Результати дослідження та порівняння нанорельєфу поверхні оптичного скла К8 після механічної обробки, лазерної та електронно-променевої мікрообробки із застосуванням сучасної автоматизованої системи керування комплексом для нанометричних досліджень показали перспективність застосування цього методу у інтегральній оптиці при виготовленні елементів мікро- та нанооптики [7].

За профілями наведеними на рис. 4, можна зробити висновок, що як після механічної (глибоке шліфування-полірування) (профіль 1, рис. 4.а), так і після лазерної мікрообробки (профіль 3, рис. 4.б) поверхня пластини з оптичного скла має характерний нанорельєф, який набагато перевищує

допустиме значення середньоарифметичної нанонерівності, що становить 5 нм.

Це вказує на неможливість використання цих методів поверхневої мікрообробки при виготовленні плат ОІС.

В той же час, нанорельєф поверхні, отриманий після електронно-променевої мікрообробки (профіль 2, рис. 4.а, б) вказує на високу точність та однорідність утворюваної поверхні, а використання даного методу дозволяє отримувати якісні поверхні з гарантованими рівнями чистоти та мікронерівностей, значення яких не перевищує 5 нм.

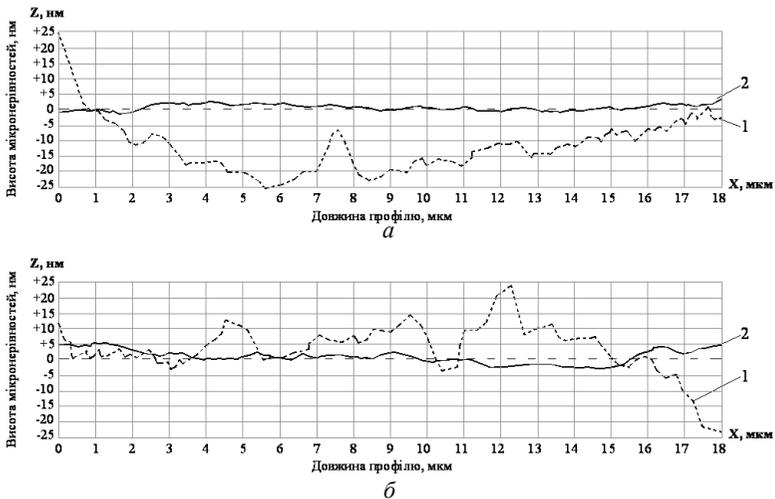


Рисунок 4 – Характерний нанорельєф поверхні оптичного скла К8 після механічної (1), електронно-променевої (2) та лазерної (3) обробки. NT-206V

Подальші дослідження нанорельєфу поверхні виробів (на прикладі круглих пластин діаметром 20 мм і товщиною 2 мм; оптичне скло К8) дозволили встановити залежність середньоарифметичної нанонерівності Ra від питомої потужності електронного потоку $P_{ном}$ (а) та від швидкості електронного потоку $V_{ном}$ (б), рис. 5.

Як можна бачити із залежностей наведених на рис. 5. а, б, за технологічними режимами описаними в роботах [8, 9], збільшення питомої потужності електронного потоку до 300 Вт/см^2 для швидкостей електронного потоку порядку 1 см/с та до питомої потужності електронного потоку 750 Вт/см^2 для швидкостей електронного потоку 8 см/с веде до зменшення середньоарифметичної нанонерівності поверхні нижче допустимого значення 5 нм.

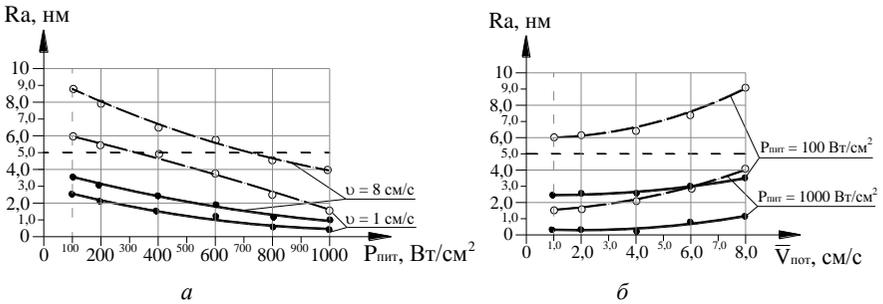


Рисунок 5 – Залежність середньоарифметичної нерівності нанорельєфу R_a від питомої потужності електронного потоку $P_{\text{пит}}$ (а) та швидкості електронно-променевої мікрообробки $V_{\text{пот}}$ (б):
 ○ – за роботами [8, 9]; ● – за вдосконаленою технологією;
 --- гранично допустимі значення нанорельєфу на поверхнях для ОІС

При цьому, за технологічними режимами отриманими для вдосконаленої авторами технологією для швидкостей електронного потоку 1...8 см/с величина середньоарифметичних нанонерівностей для усього діапазону значень питомої потужності (100...1000 Вт/см²) становить 2,2...1,5 нм.

Висновки. В процесі виконання наукових досліджень, визначені зміни нанорельєфу поверхні оптичного скла від дії низькоенергетичного електронного потоку та досліджено взаємозв'язок між розміром модифікованого нанорельєфу та параметрами електронно-променевої мікрообробки.

Встановлено, що в результаті електронно-променевої мікрообробки нанорельєф поверхонь виробів із оптичного скла К8, К108 зменшується з 4...9 нм до 1,5...2,2 нм. Це досягається шляхом керування швидкістю та питомою потужністю електронного потоку.

Отримані поверхні оптичного скла К8, К108 з нанорельєфом 1,5...2,2 нм відповідають вимогам, що висуваються сучасним оптичним виробництвом до плат оптичних інтегральних схем.

Список використаних джерел: 1. Лисоченко В. Н. Разработка элементов интегрально-оптических схем новыми методами на основе электронно-лучевой обработки / В. Н. Лисоченко, Г. В. Канашиевич, В.А. Ващенко и др. – отчет по НИР Черкасского филиала КПИ. – Черкассы. – 1993. – 205с. 2. Канашиевич Г.В. Технологічні можливості електронно-променевої обробки оптичного скла // Вісник ЧПІ. – 1998. – №3. – С.48-55. 3. Канашиевич Г.В., Котельніков Д.І., Ващенко В.А. Спеціальні методи обробки оптичного скла / Під ред. професора Д.І. Котельнікова. – Чернігів: “Сіверська думка”, 2002. – 215 с. 4. Бондаренко М.А. Исследование микрогеометрии поверхности оптических стекол после электронной и после лазерной обработки методом атомно-силовой микроскопии / М.А.Бондаренко, Ю.Б.Шевченко, В.П.Бойко, Ю.И.Коваленко [и др.] // Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии: VII Междунар. сем.,

1–3 ноября 2006 г: тезисы докл. – Минск, 2006. – С. 139-142. 5. Коваленко Ю.І. Модифікація нанорельєфу на оптичному склі електронно-променевою мікрообробкою / Ю.І.Коваленко, М.О.Бондаренко, І.В.Яценко, М.П.Рудь [та ін.] // Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – Черкаси: ЧДТУ, 2012. – №1 – С. 104-107. 6. Антонюк В.С. Підвищення мікротвердості та зносостійкості поверхонь елементів виробів з оптичного скла мікрообробкою електронним потоком у вакуумі / В.С.Антонюк, Ю.І.Коваленко, Ю.Ю.Бондаренко, М.О.Бондаренко // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – Житомир: ЖДТУ, 2015. – №1 (72) – С. 3-8. 7. Бондаренко М.О. Автоматизований комплекс для нанометричних досліджень / М.О.Бондаренко, Ю.Ю.Бондаренко // Фізика, електроніка, електротехніка (ФЕЕ-2016): наук.-техн. конф., 18-22 квітня 2016 р: тези доп. – Суми: СумДУ, 2016. – С. 200. 8. Ващенко В.А. Использование ленточного электронного луча в технологии получения элементов интегральной оптики / В.А.Ващенко, Г.В.Канашевич // Деп. ВИНТИ "Депонированные научные работы" № 11. – 1993. – 22 с. 9. Бондаренко М.О. Оптимізація параметрів стрічкового електронного потоку за допомогою зон термічного впливу / М.О.Бондаренко, В.А.Ващенко, Г.В.Канашевич // Тези доповідей першої Міжнародної НТК "Машинобудування та металообробка – 2003". – Кіровоград, 17-19 квітня 2003. – С.15-16.

Bibliography (transliterated): 1. Lisochenko V.N., Kanashevich G.V., Vashhenko V.A. i dr. Razrabotka jelementov integral'no-opticheskikh shem novymi metodami na osnove jelektronno-luchevoj obrabotki. – Otchet po NIR Cherkasskogo filiala KPI. – Cherkassy. – 1993. – 205s. 2. Kanashevich G.V. Tehnologichni mozhlivosti elektronno-promenevoi obrobki optichnogo skla. – Visnik ChITI. – 1998. – №3. – S.48-55. 3. Kanashevich G.V., Kotel'nikov D.I., Vashhenko V.A. Special'ni metodi obrobki optichnogo skla / Pid red. profesora D.I. Kotel'nikova. – Chernigiv: "Sivers'ka dumka", 2002. – 215 s. 4. Bondarenko M.A., Shevchenko Ju.B., Bojko V.P., Kovalenko Ju.I. i dr. Issledovanie mikrogeometrii poverhnosti opticheskikh stekol posle jelektronnoj i posle lazernoj obrabotki metodom atomno silovoj mikroskopii. – Metodologicheskie aspekty skanirujushhej zondovoj mikroskopii: VII Mezhdunar. sem., 1–3 nojabrja 2006 g: tezisy dokl. – Minsk, 2006. – S. 139-142. 5. Kovalenko Ju.I., Bondarenko M.O., Yatsenko I.V., Rud' M.P. ta in. Modifikacija nanorel'efu na optichnomu skli elektronno-promenevoju mikroobrobkoju. – Visnik Cherkas'kogo derzhavnogo tehnologichnogo universitetu. Serija: Tehnichni nauki. – Cherkasi: ChDTU, 2012. – №1 – S. 104-107. 6. Antonjuk V.S., Kovalenko Ju.I., Bondarenko Ju.Ju., Bondarenko M.O. Pidvishhennja mikrotverdosti ta znosostijkosti poverhon' elementiv virobiv z optichnogo skla mikroobrobkoju elektronnim potokom u vakuumi. – Visnik Zhitomir'skogo derzhavnogo tehnologichnogo universitetu. Serija: Tehnichni nauki. – Zhitomir: ZhDTU, 2015. – №1 (72) – S. 3-8. 7. Bondarenko M.O., Bondarenko Ju.Ju. Avtomatizovaniy kompleks dlja nanometrichnih doslidzhen'. – Fizika, elektronika, elektrotehnika (FEE-2016): nauk.-tehn. konf., 18-22 kvitnja 2016 r: tezi dop. – Sumi: SumDU, 2016. – S. 200. 8. Vashhenko V.A., Kanashevich G.V. Ispol'zovanie lentochnogo jelektronnogo луча v tehnologii poluchenija jelementov integral'noj optiki. – Dep. VINITI "Deponirovannye nauchnye raboty" № 11. – 1993. – 22 s. 9. Bondarenko M.O., Vashhenko V.A., Kanashevich G.V. Optimizacija parametriv strichkovogo elektronno potoku za dopomogoj z on termichnogo vplivu. – Tezi dopovidej pershoj Mizhnarodnoj NTK "Mashinobuduvannja ta metaloobrobka – 2003". – Kirovograd, 17-19 kvitnja 2003. – S.15-16.

УДК 621.7

Ю.Б. Витязев, канд. техн. наук, Я.М. Гаращенко, канд. техн. наук,
Харьков, Украина

РАЦИОНАЛЬНАЯ ОРИЕНТАЦИЯ ИЗДЕЛИЯ ПРИ ЕГО ПОСЛОЙНОМ ФОРМООБРАЗОВАНИИ НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ИСХОДНОЙ ТРИАНГУЛЯЦИОННОЙ 3D МОДЕЛИ

Розглянуто можливість раціональної орієнтації виробу при пошаровій побудові на основі статистичного аналізу розподілу кутів, утворених між векторами нормалей граней триангуляційної моделі і напрямком побудови. Запропоновано підхід, що дозволяє обґрунтовано визначати кути повороту вихідної триангуляційної моделі для ефективної матеріалізації адитивними технологіями. Наведено приклади застосування запропонованого підходу при пошаровій побудові виробів адитивними технологіями.

Ключові слова: триангуляційна модель, адитивні технології

Рассмотрена возможность рациональной ориентации изделия при послойном построении на основе статистического анализа распределения углов, образованные между векторами нормалей граней триангуляционной модели и направлением построения. Предложен подход, позволяющий обоснованно определять углы поворота исходной триангуляционной модели для эффективной материализации аддитивными технологиями. Приведены примеры применения предлагаемого подхода при послойном построении изделий аддитивными технологиями.

Ключевые слова: триангуляционная модель, аддитивные технологии

The possibility of rational orientation of product in layer-by-layer build on the basis of statistical analysis of the distribution of angles formed between normal vector of faces of triangulation model and the build direction. The proposed approach, allowing to determine the rotation angles of the original triangulated model for effective materialization of additive technologies. Examples of application of proposed approach for layered construction of products of additive technologies.

Keywords: triangulation model, additive technologies

Постановка проблеми

Інтенсивне розвиток адитивних технологій і достатньо високий потенціал реалізації їх можливостей створило потребу в розробці науково обґрунтованої методології вибору стратегії виготовлення изделий методами послойного построения на базі аналізу вихідних триангуляційних 3D моделей [1, 2].

На рис. 1 представлена схема послідовності виконання етапів технологічної підготовки виготовлення изделий з використанням адитивних технологій [3]. Рациональная ориентация изделия в рабочей области послойного построения установки является одной из первых задач, выполняемой при технологической подготовке. Ориентация изделия определяет длительность его изготовления, погрешности формообразования и физико-механические свойства. Решение задачи выбора ориентации изделия усложняется необходимостью учета множества факторов [4, 5].

Анализ литературы

В области аддитивных технологий выполнено достаточно большое количество исследовательских работ и в частности по принятию решений в выборе ориентации изделий в области послойного построения [3, 6].



Рисунок 1 – Этапы технологической подготовки изготовления изделий с использованием аддитивных технологий

В известных работах [7-21] задание рациональной ориентации изделия в рабочей области послойного построения выполняют с учетом выбранного одного или нескольких факторов. Работы [8, 11, 12, 19, 20] посвящены процессам лазерной стереолитографии (SLA), [7, 13, 14, 17, 18] – избирательного лазерного спекания (SLS), моделирования послойным оплавлением (FDM) и др. Из множества факторов выбирают следующие из них (представленные в порядке убывания частоты использования в исследовательских работах):

- отклонения от правильной формы поверхности, определяемые углом наклона нормалей треугольных граней 3D-модели относительно оси Z;
- высота изделия по оси Z (по направлению построения);
- количество и геометрические характеристики слоев для построения;

- объем поддерживающих структур;
- площадь контакта с поддерживающими структурами;
- время и себестоимость изготовления;
- параметры шероховатости поверхности, определяемые углом наклона нормалей треугольных граней 3D-модели относительно оси Z ;
- физико-механические свойства изделия;
- объем закрытых полостей;
- характеристики устойчивого положения равновесия модели.

В качестве наиболее представительных исследуемых признаков триангуляционной 3D-модели с учетом рассмотренных работ [7-21] для определения рациональной ориентации выбраны угол наклона нормалей граней относительно вектора направления построения (координатной оси Z) α_z и высота изделия h_z по оси Z . Данные исследуемые признаки являются наиболее значимыми из геометрических свойств 3D-модели, т.к. α_z определяет шероховатость и погрешности формообразования поверхностей изделия и h_z – время построения. Информативность статистического анализа распределения величины угла α_z дополнительно расширяется следующими обстоятельствами:

- поверхности с нормальями, имеющие тупой угол α_z , определяют конструкцию поддерживающих структур и соответственно трудоемкость процессов постобработки для удаления таких поддержек;

- шаг построения, как правило, задается с учетом угла наклона нормалей граней, а соответственно влияет на время построения.

Например, в работе [16] для определения рациональной ориентации изделия предложено использовать зависимость параметров шероховатости поверхности изделия от угла наклона грани α_z , полученной экспериментально. Параметры шероховатости вычисляются для каждой грани триангуляционной 3D-модели изделия. Целевой функцией для определения оптимальной ориентации является среднеарифметическое значение параметра шероховатости для всей поверхности модели изделия. Использование среднего значения исследуемого признака приводит к тому, что упускается из внимания поверхности с грубой шероховатостью.

Определение ориентации изделия в работе [22] выполняется путем оптимизации при максимизации целевой функции. В качестве целевой функции принята суммарная площадь граней триангуляционной 3D-модели с нормальями $|N_z|=1$ и $N_z=0$, т.е. при $\alpha_z = 0^\circ, 90^\circ$ или 180° , для которых обеспечивается минимальная погрешность. В результате получаемое изделие будет иметь наибольшую площадь поверхностей (перпендикулярных и параллельных вектору направления построения) с отсутствующим эффектом «ступенчатости». Недостатком такого подхода является ограниченность в применении из-за того, что не принимается во внимание ориентация всех граней, что неприменимо для сложных изделий, которые, как правило,

изготавливаются послойным построением.

В данной работе рассмотрена научная гипотеза о том, что определение рациональной ориентации изделия в рабочей области послойного построения на основе минимизации площади поверхности с наибольшей величиной погрешности формообразования позволит применительно к изделиям со сложной геометрией определять их рациональную ориентацию.

Цель статьи – рассмотреть возможности определения рациональной ориентации изделия в области послойного построения из набора вариантов на основе статистического анализа исследуемых признаков триангуляционной 3D-модели.

Изложение основного материала

Исследование возможностей по определению рациональной ориентации триангуляционной 3D-модели в рабочей области послойного построения выполнялось в системе "Технологическая подготовка материализации сложных изделий аддитивными технологиями", разработанной на кафедре "Интегрированные технологии машиностроения" им. М.Ф. Семко НТУ "ХПИ". Данная система позволяет выполнять оценку технологичности конструкции изделия и анализ эффективности использования аддитивных технологий на этапе их технологической подготовки. В системе предусмотрена подсистема, ориентированная на решение задачи статистического анализа исследуемых признаков для набора вариантов ориентации 3D-модели изделия.

Экранная форма подсистемы статистического анализа вариантов ориентации изделия представлена на рис. 2. Система позволяет определять рациональные варианты ориентации изделия на основе результатов статистического анализа распределения величин исследуемого признака (угла наклона нормалей граней α_z относительно вектора направления построения по относительная их площади S_{Rel}).

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

- формирование набора вариантов ориентации изделия по заданной дискретности изменения углов поворота 3D-модели вокруг осей X и Y ;
- статистический анализ (определение 12-и статистических характеристик) и построение гистограмм распределения исследуемого признака по площади треугольных граней;
- запись результатов расчетов в общую таблицу для сравнительного анализа;
- сохранение результатов статистического анализа в файл XLS-формата для дальнейшей работы с ними в стороннем программном обеспечении;
- вывод формы визуализации результатов анализа в виде плотности или интегральной функции вероятности.

Задание цвета для выделения вариантов по заданным условиям диапазона углов α_z наклона нормалей граней и их относительной площади S_{rel}

Формирование набора вариантов ориентации изделия

Количество вариантов ориентации

Компоненты цвета (цветовая модель RGB) для каждого варианта условий

Дискретность поворота 3D-модели вокруг осей X и Y

Анализ данных распределения исследуемого признака

Сохранение результатов статистического анализа в файл XLS-формата

Сохранение ориентации 3D-модели изделия, данных статистического анализа. Сохранение выbranного варианта ориентации в файл STL-формата

Количество интервалов гистограммы распределения

Варианты ориентации и статистические характеристики распределения угла наклона вектора нормали относительно оси Z

Вариант	Высота изделия по оси Z	Площадь 1-й вар.	Площадь 2-й вар.	Площадь 3-й вар.	Гистограмма	Количество	Мин.	Мак.
1	33,00	0,8 %	39,3 %	7,3 %	Просмотр	10	0E00	10
2	74,95	31,2 %	39,7 %	28,1 %	Просмотр	10	1,07E-01	10
3	109,26	0,6 %	40,9 %	26,5 %	Просмотр	10	1,34E-01	10
4	144,54	5,8 %	81,5 %	8,3 %	Просмотр	10	7,48E-01	10
5	162,39	8,1 %	79,6 %	8,1 %	Просмотр	10	4,73E-01	10
6	162,39	8,8 %	79,4 %	8,1 %	Просмотр	10	1,08E-01	10
7	144,54	8,4 %	81,3 %	5,7 %	Просмотр	10	4,99E-01	10
8	110,99	5,2 %	40,7 %	31 %	Просмотр	10	1,52E-01	10
9	75,57	28,1 %	39,5 %	31,2 %	Просмотр	10	6,96E-02	10
10	33,00	7,3 %	39,9 %	0,8 %	Просмотр	10	0E00	10
11	74,95	28,1 %	39,5 %	31,2 %	Просмотр	10	1,03E-01	10
12	109,26	5,2 %	40,7 %	31 %	Просмотр	10	3,96E-02	10

Промотор гистограммы распределения

Анализ выполнен. Время расчета: 0 ч. 5 мин. 52 с. 450 мс.

Рисунок 2 – Подсистема статистического анализа вариантов ориентации изделия в области послыного построения

Анализ набора вариантов предусмотрен по двум исследуемым признакам триангуляционной 3D-модели изделия: угол наклона нормалей граней α_Z и высота изделия h_Z .

Угол наклона грани α_Z рассчитывается по коэффициентам единичного вектора нормали N_X, N_Y, N_Z . Величины коэффициентов N_X, N_Y, N_Z , как правило, представлены в исходном STL-файле. В противном случае данные коэффициенты рассчитываются по известным зависимостям [23] исходя из координат вершин треугольной грани:

$$N_{x,i} = \frac{A_i}{\sqrt{A_i^2 + B_i^2 + C_i^2}}, \quad N_{y,i} = \frac{B_i}{\sqrt{A_i^2 + B_i^2 + C_i^2}}, \quad N_{z,i} = \frac{C_i}{\sqrt{A_i^2 + B_i^2 + C_i^2}},$$

$$A_i = (y_{i2} - y_{i1})(z_{i3} - z_{i1}) - (y_{i3} - y_{i1})(z_{i2} - z_{i1}),$$

$$B_i = (x_{i1} - x_{i3})(z_{i2} - z_{i1}) - (x_{i2} - x_{i1})(z_{i3} - z_{i1}),$$

$$C_i = (x_{i2} - x_{i1})(y_{i3} - y_{i1}) - (x_{i3} - x_{i1})(y_{i2} - y_{i1}).$$

где A_i, B_i, C_i – коэффициенты уравнения плоскости, проходящей через вершины $V_{i1}(x_{i1}, y_{i1}, z_{i1}), V_{i2}(x_{i2}, y_{i2}, z_{i2}), V_{i3}(x_{i3}, y_{i3}, z_{i3})$.

Формирование варианта ориентации осуществляется преобразованием 3D-модели с расчетом координат вершин и векторов нормалей треугольных граней. Определение координат вершин выполняется с учетом уравнения поворота системы координат [23] по следующей зависимости:

$$x'_i = x_i \cos(\varphi_Y) + z_i \sin(\varphi_Y),$$

$$y'_i = (x_i \sin(\varphi_Y) - z_i \cos(\varphi_Y)) \sin(\varphi_X) + y_i \cos(\varphi_X),$$

$$z'_i = -x_i \sin(\varphi_Y) + y_i \sin(\varphi_X) + z_i \cos(\varphi_Y) \cos(\varphi_X),$$

где x'_i, y'_i, z'_i – координаты вершины $V_i(x_i, y_i, z_i)$ после поворота 3D-модели на угол φ_X и φ_Y вокруг осей X, Y соответственно.

Высота изделия определяется как размах величин координат вершин триангуляционной модели по оси Z :

$$h_Z = \{z'_i\}_{\max} - \{z'_i\}_{\min}.$$

Углы наклона нормалей граней относительно вектора направления построения α_Z определяются с учетом уравнения поворота системы координат [23] по следующей зависимости:

$$\alpha_Z = \frac{180N'_Z}{\pi}, \quad N'_Z = -N_X \sin(\varphi_Y) + N_Y \sin(\varphi_X) + N_Z \cos(\varphi_Y) \cos(\varphi_X),$$

где N'_Z – координата по оси Z вектора нормали грани F_j (N_{Xj} , N_{Yj} , N_{Zj}) после поворота триангуляционной 3D-модели.

Статистический анализ тестовых триангуляционных моделей изделий по распределению величины α_Z позволил выявить следующее:

- предлагаемые подходы в работах [16, 22] по определению рациональной ориентации изделия имеют ограниченное применение только для моделей изделий с несложной геометрией;

- рациональная ориентация изделия может задаваться в достаточно широкой области значений углов φ_x , φ_y поворота модели, что представляет интерес для уточнения данных углов по дополнительным критериям оптимизации или в последующих задачах технологической подготовки.

С учетом полученных результатов анализа плотности распределения величины α_Z для набора моделей изделий различной степени сложности предложено выбирать ориентацию изделия, которая позволяет обеспечивать минимальную площадь поверхности с наибольшей величиной отклонения формы.

Практика использования аддитивных технологий показывает увеличенные отклонения формы для поверхностей с небольшим углом наклона их нормали относительно оси Z . Поэтому представляет интерес определение площади граней S_i с наклоном нормалей α_Z , которые удовлетворяют следующему условию:

$$\alpha_Z \in (0^\circ, \alpha_{\max}) \vee \alpha_Z \in (180^\circ - \alpha_{\max}, 180^\circ), \quad (1)$$

где α_{\max} – максимальное значение угла, ограниченного допустимой погрешностью формообразования, $\cos \alpha_{\max} = \Delta/h_{\min}$ (если $\Delta > 0.7h_{\min}$ тогда $\alpha_{\max} \in [30^\circ, 45^\circ]$);

Δ – допустимая погрешность формообразования;

h_{\min} – минимальная величина шага построения, ограниченная технологическими возможностями установки или требуемыми физико-механическими свойствами изделия.

В результате ориентация изделия должна осуществляться при минимизации следующей функции:

$$F = \min_{1 \leq j \leq m} \left(\sum_{i=1}^n S_i \right), \quad (2)$$

где S_i – площадь i -й грани триангуляционной 3D-модели соответствующей условию (1);

n – количество граней соответствующие условию (1);

m – общее количество вариантов ориентации изделия.

На рис. 3 представлен алгоритм определения углов поворота 3D-модели, реализованный в разработанной подсистеме.



Рисунок 3 – Алгоритм определения углов поворота 3D-модели изделия для его рациональной ориентации в области послыонного построения

Предложенный критерий (2) для выбора оптимальной ориентации изделия позволяет для сложных изделий минимизировать площадь поверхностей с наибольшими отклонениями формообразования, имеющих наиболее выраженный эффект «ступенчатости» поверхности.

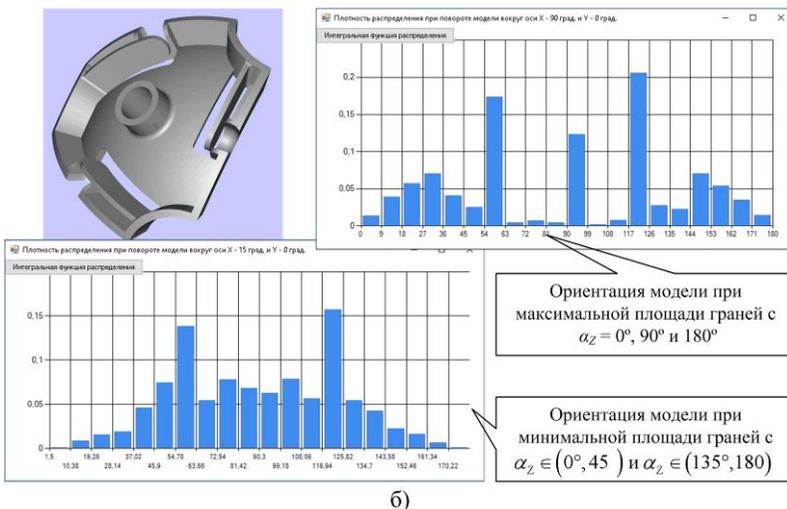
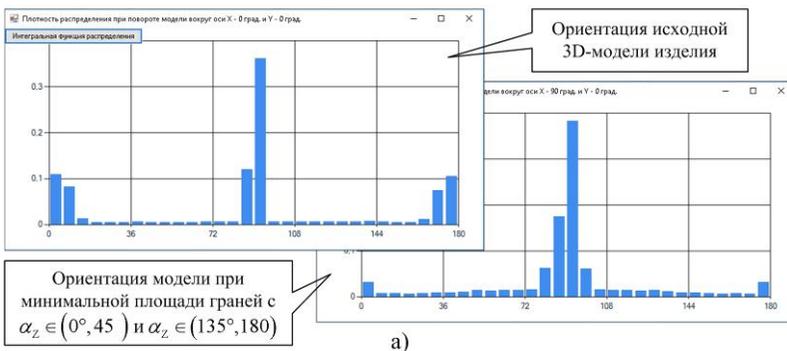
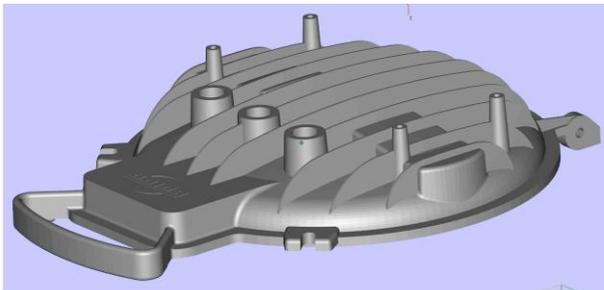


Рисунок 4 – Тестовые 3D-модели изделий и гистограммы распределения величин угла наклона нормалей треугольных граней 3D-модели относительно вектора направления построения α_z по их площади

Тестовые триангуляционные 3D-модели изделий с результатами статистического анализа (гистограммы распределения величин угла наклона нормалей граней относительно вектора направления построения α_z по относительной площади граней) представлены на рис. 4-6. Модель крышки (рис. 4 а) состоит из 146 946 треугольных граней (общая площадь модели $S_{Face} = 324.3$ тыс. мм²). В исходном положении 3D-модели относительная площадь треугольных граней, удовлетворяющих условию (1) для $\alpha_{max} = 30^\circ - 26.7\%$, для $\alpha_{max} = 45^\circ - 29.3\%$. На рис. 4 а представлена гистограмма распределения величин угла α_z для оптимального варианта ориентации, полученного с использованием предложенного алгоритма (рис. 2). Оптимальный вариант получен при повороте исходной модели на угол 90° вокруг оси X. Относительная площадь треугольных граней с углом $\alpha_z \in (0^\circ, \alpha_{max})$ составляет для $\alpha_{max} = 30^\circ - 11.5\%$, для $\alpha_{max} = 45^\circ - 16.2\%$. Таким образом ориентация модели с использованием функции (2) позволяет уменьшить площадь поверхности с наиболее выраженным эффектом "ступенчатости" приблизительно в 2.3 раза (при $\alpha_{max} = 30^\circ$) по сравнению с исходным положением.

Подход к определению рациональной ориентации изделия, описанный в работе [24] не во всех случаях позволяет определить оптимальные варианты ориентации, обеспечивающие снижение максимальной погрешности построения. В данной работе оптимизация углов поворота 3D-модели выполняется путем максимизации площади поверхности с минимальной погрешностью, т.е. с нормальными гранями $\alpha_z = 0^\circ, 90^\circ$ или 180° . Пример тестовой модели изделия (количество треугольных граней $N_{Face} = 32\ 668$ шт., площадь $S_{Face} = 4.5$ тыс. мм²), приведенный на рис. 4 б, подтверждает ограничения данного критерия оптимизации. Сравнительный анализ плотности распределения относительной площади граней (рис. 4 б) для целевой функции, предложенной в работе [24] и по функции (2) показывает существенные различия. Ориентация 3D-модели, полученная по функции (2) позволяет уменьшить площадь поверхности, треугольные грани которой имеют угол $\alpha_z \in (0^\circ, 30^\circ)$ более чем в 4-е раза. На рис. 5 представлен пример модели изделия с простой геометрией ($N_{Face} = 1\ 624$ шт., $S_{Face} = 11.4$ тыс. мм²). Применительно к данной модели совпала ориентация изделия, выбранная по двум рассматриваемым целевым функциям. Оба варианта для моделей с несложной геометрией вполне достоверно определяют оптимальный вариант ориентации. Для моделей с более сложной геометрией (например, как для моделей на рис. 4) предлагаемый критерий позволяет с большей достоверностью выявлять оптимальный вариант благодаря минимизации площади поверхности с наибольшими погрешностями. Оптимизация по целевой функции (2) также предлагает большее количество оптимальных вариантов, из которых можно выбирать по другим критериям.

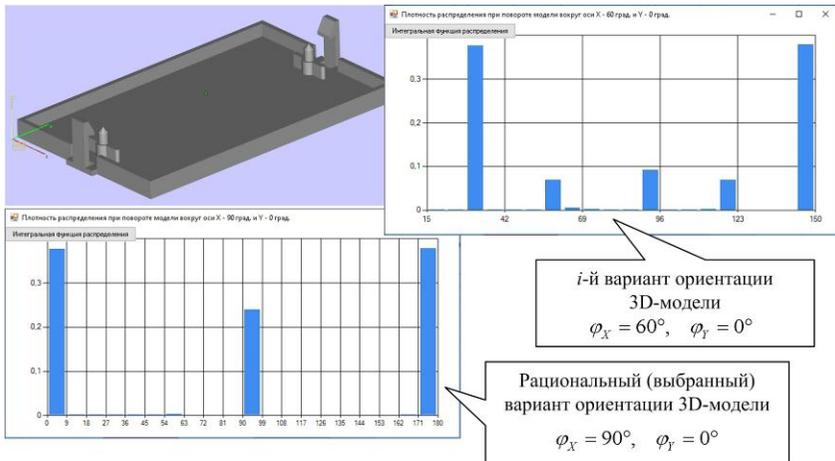


Рисунок 5 – Тестовая 3D-модель изделия с простой геометрией поверхностей и гистограммы распределения величин угла наклона нормалей α_Z по площади треугольных граней

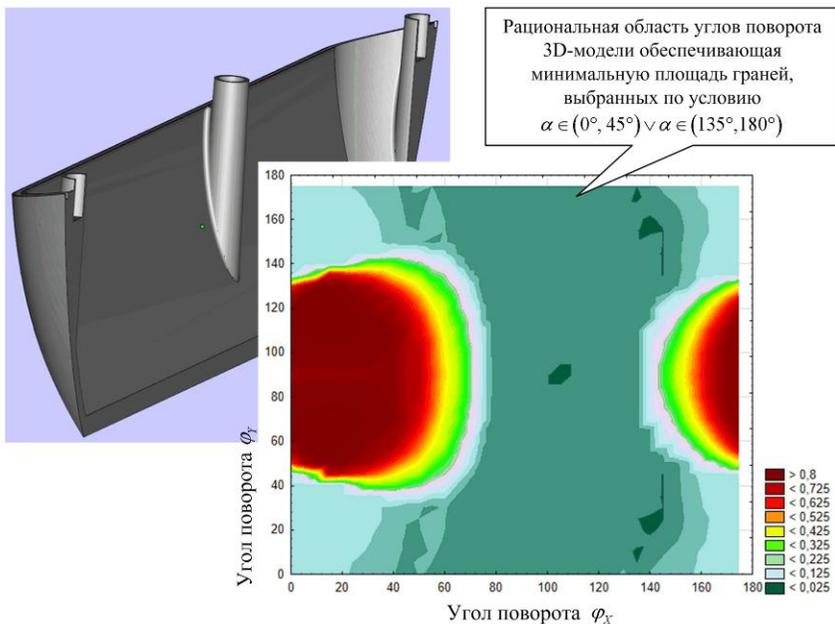


Рисунок 6 – Тестовая 3D-модель изделия и график зависимости относительной площади треугольных граней по углу наклона их нормалей относительно вектора направления построения α_Z в зависимости от углов поворота 3D-модели вокруг координатных осей X и Y

На примере элемента корпуса с криволинейной поверхностью (рис. 6) представлен график зависимости относительной площади треугольных граней, нормали которых удовлетворяют заданному условию (1) от углов поворота 3D-модели вокруг координатных осей X и Y . Данный график демонстрирует достаточно большую область значений углов поворота 3D-модели, обеспечивающих рациональную ориентацию. Такое определение области значений углов φ_x , φ_y представляет интерес, т.к. позволяет дополнительно учитывать остальные критерии выбора рациональной ориентации. Например, высоты изделия по оси Z , влияющей на время построения.

Выводы

Решение оптимизационной задачи технологической подготовки по определению рациональной ориентации изделия в области послойного построения на основе целевой функции минимизации площади поверхности с наибольшей величиной погрешности формообразования показывает достаточно высокую эффективность применительно к изделиям со сложной геометрией.

Определение области значений углов поворота триангуляционной 3D-модели для задания рациональной ориентации изделия позволит расширить возможности технологической подготовки аддитивных технологий путем увеличения вариантов рациональной ориентации, что необходимо при решении последующих задач по рациональному расположению в рабочей области построения.

Результаты работы создают методологическую основу для повышения эффективности технологической подготовки материализации сложных изделий аддитивными технологиями.

Список использованных источников: 1. Saravia, M., Newnesb, L., Milehamb, A.R., & Gohb, Y.M. Estimating cost at the conceptual design stage to optimize design in terms of performance and cost. Proceedings of the 15th ISPE International Conference on Concurrent Engineering, 2008, pp. 123-130. Springer-Verlag. - DOI: 10.1007/978-1-84800-972-1_11. 2. Quan, Z., Gao, Z., Wang, Q., Sun, Y., Chen, X., & Wang, Y. Geometric Analysis of Casting Components. 2nd World Congress on Integrated Computational Materials Engineering (ICME), 2013, pp. 103-108. John Wiley & Sons, Inc. - DOI: 10.1002/9781118767061.ch17. 3. Kulkarni P., Marsan A., Dutta D. A review of process planning techniques in layered manufacturing. Rapid prototyping journal, 6(1), pp. 18-35, 2000. DOI: 10.1108/13552540010309859. 4. Byun H.S., Lee K.H. Determination of optimal build direction in rapid prototyping with variable slicing. Int J Adv Manuf Technol (2006) 28: p. 307–313. DOI: 10.1007/s00170-004-2355-5. 5. Canellidis V., Giannatsis J., Dedoussis V. Genetic-algorithm-based multi-objective optimization of the build orientation in stereolithography. Int J Adv Manuf Technol (2009) 45: 714–730. DOI: 10.1007/s00170-009-2006-y. 6. Kumke M., Watschke H., Vietor T. A new methodological framework for design for additive manufacturing. Virtual And Physical Prototyping Vol. 11, Iss. 1, 2016, pp. 3-19, <http://dx.doi.org/10.1080/17452759.2016.1139377>. 7. Paul Alexander, Seth Allen, Debasish Dutta, Part orientation and build cost determination in layered manufacturing, Computer-Aided Design, Volume 30, Issue 5, 1998, pp. 343-356, ISSN 0010-4485, [http://dx.doi.org/10.1016/S0010-4485\(97\)00083-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0010-4485(97)00083-3). 8. Cheng W. Multi-objective optimization of part-

building orientation in stereolithography / *W. Cheng, J.Y.H. Fuh, A.Y.C. Nee, Y.S. Wong, H.T. Loh, T. Miyazawa* // *Rapid Prototyping J.* - 1995. - Vol. 1. - No. 4. - pp. 12-23, <https://doi.org/10.1108/13552549510104429>. **9.** *Byun H.S., Lee K.H.* Determination of optimal build direction in rapid prototyping with variable slicing. *Int J Adv Manuf Technol*, 2006, 28. pp. 307–313. DOI: 10.1007/s00170-004-2355-5. **10.** *Hong S. Byun.* Optimal part orientation of rapid prototyping using a genetic algorithm / *Hong S. Byun, Kwan H. Lee* // *Proc. of the 34th Int. Conf. on Computers & Industrial Engineering.* - 2004. - P. 426-431. **11.** *Hur J.* The development of a CAD environment to determine the preferred build-up direction for layered manufacturing / *J. Hur, K. Lee* // *The Int. J. of Adv. Manuf. Technol.* - 1998. - No. 14. - pp. 247-254. <https://doi.org/10.1007/BF01199879>. **12.** *Po-Ting Lan, Shuo-Yan Chou, Lin-Lin Chen, Douglas Gemmill,* Determining fabrication orientations for rapid prototyping with Stereolithography apparatus, *Computer-Aided Design*, Volume 29, Issue 1, 1997, pp. 53-62. ISSN 0010-4485, [http://dx.doi.org/10.1016/S0010-4485\(96\)00049-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0010-4485(96)00049-8). **13.** *Massod S.H.* A generic algorithm for part orientation system for complex parts in rapid prototyping / *S.H. Massod, W. Rattanawong, P. Iovenitti.* - *J. Mater. Process. Technol.* - 2003. -Vol. 139. - Nos. 1-3. - pp. 110-116. DOI: 10.1016/S0924-0136(03)00190-0. **14.** *Pandey P.M.* Optimal part deposition orientation in FDM by using a multi-criteria Genetic Algorithm / *P.M. Pandey, K. Thrimurtullu, N.V. Reddy* // *Int. J. of Production Research.* -2004. - Vol. 42. - No. 19. - P. 4069-4089. **15.** *Satyandra K. Gupta.* Finding near-optimal build orientations for shape deposition manufacturing / *Satyandra K. Gupta, Qi Tian, Lee E. Weiss* // *Proceedings of the IFIP TC5 WG5.3 Int. Conf. on Sculptured Surface Machining.* - 1998. - Vol. 146. - P. 208-216. **16.** *Singhal S.K.* Optimum part deposition orientation in stereolithography / *S.K. Singhal, A.P. Pandey, P.M. Pandey, A.K. Nagpal* // *Computer-Aided Design & Applications.* - 2005. - Vol. 2. - Nos. 1-4. - pp. 319-328. **17.** *Thompson D.C.* Optimizing part quality with orientation / *D.C. Thompson, R.H. Crawford* // *Proc. of the Solid Freeform Fabrication Symposium.* - 1995. - Vol. 6. - P. 362-368. **18.** *Thrimurtullu K.* Optimal part deposition orientation in fused deposition modeling / *K. Thrimurtullu, P.M. Pandey, N.V. Reddy* // *Int. J. of Machine Tools and Manufacture.* - 2003. -Vol. 44. - No. 6. - P. 585-594. DOI: 10.1016/j.ijmactools.2003.12.004. **19.** *Xu F., Wong Y., Loh H., Fuh J., Miyawaza T.* Optimal orientation with variable slicing in stereolithography. *Rapid Prototyping Journal* 1997; 3(3): pp. 76-88. <https://doi.org/10.1108/13552549710185644>. **20.** *Paramita Das, Ramya Chandran, Rutuja Samant, Sam Anand,* Optimum Part Build Orientation in Additive Manufacturing for Minimizing Part Errors and Support Structures, *Procedia Manufacturing*, Vol. 1, 2015, pp. 343-354, <http://dx.doi.org/10.1016/j.promfg.2015.09.041>. **21.** *Jayanath Majhi, Ravi Janardan, Michiel Smid, Jorg Schwerdt.* Multi-criteria geometric optimization problems in layered manufacturing. *Proceedings of the fourteenth annual symposium on Computational geometry*, pp. 19-28, ACM New York, NY, USA, 1998. ISBN: 0-89791-973-4. **22.** *Доброскок В.Л.* Рациональная ориентация изделий при их послыном формообразовании на базе исходной триангуляционной 3D модели / *В.Л. Доброскок, Л.Н. Абдурайимов, С.И. Чернышов* // *Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. Технические науки.* - Симферополь: НИЦ КИПУ, 2010. - Вып. 24. - С. 13-21. **23.** *Выгодский М.Я.* Справочник по высшей математике. – М.: АСТ: Астрель, 2006. – 991 с. **24.** Пат. 54398 У УКРАЇНА, МПК B29C 35/08, B29C 41/02, G06F 17/50, G06F 19/00. Спосіб пошарової побудови виробів на базі вихідної триангуляційної 3D моделі / *Абдурайимов Л.Н., Чернышов С.И., Доброскок В.Л., Витязев Ю.Б.*; заявник і патентовласник Нац. техн. ун-т "Харківський політехн. ін-т". - № u201004548; Заявл. 19.04.2010; Опубл. 10.11.2010, Бюл. № 21.

Bibliography (transliterated): **1.** Saravia, M., Newnesb, L., Milehamb, A.R., & Gohb, Y.M. Estimating cost at the conceptual design stage to optimize design in terms of performance and cost. *Proceedings of the 15th ISPE International Conference on Concurrent Engineering*, 2008, pp. 123-130. Springer-Verlag. - DOI: 10.1007/978-1-84800-972-1_11. **2.** Quan, Z., Gao, Z., Wang, Q., Sun, Y., Chen, X., & Wang, Y. Geometric Analysis of Casting Components. *2nd World Congress on Integrated Computational Materials Engineering (ICME)*, 2013, pp. 103-108. John Wiley & Sons, Inc. - DOI: 10.1002/9781118767061.ch17. **3.** Kulkarni P., Marsan A., Dutta D. A review of process planning techniques in layered manufacturing. *Rapid prototyping journal*, 6(1), pp. 18-35, 2000. DOI: 10.1108/13552540010309859. **4.** Byun H.S., Lee K.H. Determination of optimal build direction in rapid prototyping with variable slicing. *Int J Adv Manuf Technol* (2006) 28: p. 307–313.

DOI: 10.1007/s00170-004-2355-5. **5.** Canellidis V., Giannatsis J., Dedoussis V. Genetic-algorithm-based multi-objective optimization of the build orientation in stereolithography. *Int J Adv Manuf Technol* (2009) 45: 714–730. DOI: 10.1007/s00170-009-2006-y. **6.** Kumke M., Watschke H., Vietor T. A new methodological framework for design for additive manufacturing. *Virtual And Physical Prototyping* Vol. 11, Iss. 1, 2016, pp. 3-19, <http://dx.doi.org/10.1080/17452759.2016.1139377>. **7.** Paul Alexander, Seth Allen, Debasish Dutta, Part orientation and build cost determination in layered manufacturing. *Computer-Aided Design*, Volume 30, Issue 5, 1998, pp. 343-356, ISSN 0010-4485, [http://dx.doi.org/10.1016/S0010-4485\(97\)00083-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0010-4485(97)00083-3). **8.** Cheng W. Multi-objective optimization of part-building orientation in stereolithography / W. Cheng, J.Y.H. Fuh, A.Y.C. Nee, Y.S. Wong, H.T. Loh, T. Miyazawa // *Rapid Prototyping J.* - 1995. - Vol. 1. - No. 4. - pp. 12-23, <https://doi.org/10.1108/13552549510104429>. **9.** Byun H.S., Lee K.H. Determination of optimal build direction in rapid prototyping with variable slicing. *Int J Adv Manuf Technol*, 2006, 28. pp. 307–313. DOI: 10.1007/s00170-004-2355-5. **10.** Hong S. Byun. Optimal part orientation of rapid prototyping using a genetic algorithm / Hong S. Byun, Kwan H. Lee // *Proc. of the 34th Int. Conf. on Computers & Industrial Engineering.* - 2004. - P. 426-431. **11.** Hur J. The development of a CAD environment to determine the preferred build-up direction for layered manufacturing / J. Hur, K. Lee // *The Int. J. of Adv. Manuf. Technol.* - 1998. - No. 14. - pp. 247-254. <https://doi.org/10.1007/BF01199879>. **12.** Po-Ting Lan, Shuo-Yan Chou, Lin-Lin Chen, Douglas Gemmill, Determining fabrication orientations for rapid prototyping with Stereolithography apparatus, *Computer-Aided Design*, Volume 29, Issue 1, 1997, pp. 53-62. ISSN 0010-4485, [http://dx.doi.org/10.1016/S0010-4485\(96\)00049-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0010-4485(96)00049-8). **13.** Massod S.H. A generic algorithm for part orientation system for complex parts in rapid prototyping / S.H. Massod, W. Rattanawong, P. Iovenitti. - J. Mater. Process. Technol. - 2003. - Vol. 139. - Nos. 1-3. - pp. 110-116. DOI: 10.1016/S0924-0136(03)00190-0. **14.** Pandey P.M. Optimal part deposition orientation in FDM by using a multi-criteria Genetic Algorithm / P.M. Pandey, K. Thrimurtullu, N.V. Reddy // *Int. J. of Production Research.* -2004. - Vol. 42. - No. 19. - P. 4069-4089. **15.** Satyandra K. Gupta. Finding near-optimal build orientations for shape deposition manufacturing / Satyandra K. Gupta, Qi Tian, Lee E. Weiss // *Proceedings of the IFIP TC5 WG5.3 Int. Conf. on Sculptured Surface Machining.* - 1998. - Vol. 146. - P. 208-216. **16.** Singhal S.K. Optimum part deposition orientation in stereolithography / S.K. Singhal, A.P. Pandey, P.M. Pandey, A.K. Nagpal // *Computer-Aided Design & Applications.* - 2005. -Vol. 2. - Nos. 1-4. - pp. 319-328. **17.** Thompson D.C. Optimizing part quality with orientation / D.C. Thompson, R.H. Crawford // *Proc. of the Solid Freeform Fabrication Symposium.* - 1995. - Vol. 6. - P. 362-368. **18.** Thrimurtullu K. Optimal part deposition orientation in fused deposition modeling / K. Thrimurtullu, P.M. Pandey, N.V. Reddy // *Int. J. of Machine Tools and Manufacture.* - 2003. -Vol. 44. - No. 6. - P. 585-594. DOI: 10.1016/j.ijmactools.2003.12.004. **19.** Xu F., Wong Y., Loh H., Fuh J., Miyawaza T. Optimal orientation with variable slicing in stereolithography. *Rapid Prototyping Journal* 1997; 3(3): pp. 76-88. <https://doi.org/10.1108/13552549710185644>. **20.** Paramita Das, Ramya Chandran, Rutuja Samant, Sam Anand, Optimum Part Build Orientation in Additive Manufacturing for Minimizing Part Errors and Support Structures, *Procedia Manufacturing*, Vol. 1, 2015, pp. 343-354, <http://dx.doi.org/10.1016/j.promfg.2015.09.041>. **21.** Jayanth Majhi, Ravi Janardan, Michiel Smid, Jorg Schwerdt. Multi-criteria geometric optimization problems in layered manufacturing. *Proceedings of the fourteenth annual symposium on Computational geometry*, pp. 19-28, ACM New York, NY, USA, 1998. ISBN: 0-89791-973-4. **22.** Dobroskok V.L., Abdurajimov, L.N., Chernyshov S.I. Racional'naja orientacija izdelij pri ih poslojnom formoobrazovanii na baze ishodnoj trianguljacionnoj 3D modeli. – Uchenye zapiski Krymskogo inzhenerno-pedagogicheskogo universiteta. Tehnicheskie nauki. – Simferopol': NIC KIPU, 2010. - Vyp. 24. - S. 13-21. **23.** Vygodskij M.Ja. Spravochnik po vysshej matematike. – M.: AST: Astrel', 2006. – 991 s. **24.** Pat. 54398 U UKRAYINA, MPK B29Ts 35/08, B29Ts 41/02, G06F 17/50, G06F 19/00. Sposib posharovoyi pobudovy vyrobiv na bazi vykhidnoyi trianhulyatsiyanoi 3D modeli / Abdurajimov L.N., Chernyshov S.I., Dobroskok V.L., Vityazev Yu.B.; zayavnyk i patentovlasnyk Nats. tekhn. un-t "Kharkivs'kyi politekhn. in-t". – Nu201004548; Zayavl. 19.04.2010; Opubl. 10.11.2010, Byul. N 21.

УДК 621.923

М.И. Гасанов, канд. техн. наук, Харьков, Украина

ТВЕРДОСПЛАВНЫЕ ЧЕРВЯЧНЫЕ ФРЕЗЫ ПОСЛЕ АЛМАЗНОЙ ЗАТОЧКИ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

У статті розглянуті процеси формоутворення для відновлення великогабаритних зубчастих коліс після на-плавки з підшарового шаром спеціальними твердосплавними фрезами після алмазної заточки, які забезпечують значитель-ве зменшення довжини головних різальних крайок і таким чином полегшують алмазну заточку інструменту. Виходячи з міні-бітної довжини ріжучої частини фрез була розроблена технологія відновлення зубів великогабаритних циліндричних зубчастих коліс спеціальними фрезами, у яких довжина ріжучих крайок зубів не залежить від розмірів оброблюваних зубів колеса.

Ключові слова: відновлення, великогабаритні зубчасті колеса, спеціальні, твердосплавні фрези, алмазна заточка, ріжучі кромки

В статье рассмотрены процессы формообразование для восстановления крупногабаритных зубчатых колес после наплавки с подслоиным слоем специальными твердосплавными фрезами после алмазной заточки, которые обеспечивают значительное уменьшение длины главных режущих кромок и таким образом облегчают алмазную заточку инструмента. Исходя из минимальной длины режущей части фрез была разработана технология восстановления зубьев крупногабаритных цилиндрических зубчатых колес специальными фрезами, у которых длина режущих кромок зубьев не зависит от размеров обрабатываемых зубьев колеса.

Ключевые слова: восстановление, крупногабаритные зубчатые колеса, специальные, твердосплавные фрезы, алмазная заточка, режущие кромки

In the article, shaping processes for the recovery of large-sized gears after smelting with a sublayer layer with special carbide cutters after diamond sharpening are considered, which provide a significant reduction in the length of the main cutting edges and thus facilitate the diamond sharpening of the tool. Proceeding from the minimum length of the cutting part of the milling cutters, a technology was developed for restoring the teeth of large-sized cylindrical gears with special cutters, in which the length of the cutting edges of the teeth does not depend on the size of the machined teeth of the wheel.

Keywords: recovery, large-sized cogwheels, special, carbide cutters, diamond sharpening, cutting edges

Введение

Восстановления крупногабаритных зубчатых колес во многом тесно связаны с разработкой конструкторско-технологических схем формообразования зубьев: способов ремонта, напыления, наплавки с подслоечным слоем однослойным или двухслойным и подготовки твердосплавного инструмента.

Одним из основных факторов при восстановлении цилиндрических зубчатых колёс является выбор оптимальной схемы резания и кинематики зубообработки специальными твердосплавными фрезами, которые

обеспечивают значительное уменьшение длины главных режущих кромок и таким образом облегчают алмазную заточку инструмент [1; 2; 3; 4; 5].

Технология обработки зубьев традиционно-стандартными червячными фрезами, у которых размеры режущих кромок зависят от размеров (модуля) обрабатываемых зубьев колеса, не позволяют увеличить количество режущих элементов и снизить нагрузки на режущие кромки червячных фрез, особенно при оснащении фрез твёрдым сплавом. Из-за значительных размеров режущих кромок усложняются процесс напайки зубьев твердым сплавом, шлифование зубьев, обеспечение точности инструмента.

Основное содержание

Между тем, анализ технологических схем резания зубьев червячной фрезой при восстановлении крупногабаритных зубчатых колес (рис. 1, *а*) показывает, что в этом случае нет необходимости выполнять режущие кромки инструмента, соизмеримыми с размерами обрабатываемых зубьев колеса; т. к. не всей длиной кромки режущие зубья участвуют в резании. Рабочая длина режущей кромки определяется из условия обязательного обеспечения перекрытия резцов в процессе огибания эвольвентной поверхности зубьями фрезы и включает два участка, *А* и *Б*, расположенные, соответственно, ниже и выше точки профилирования *С*. Длина участков *А* и *Б* увеличивается с увеличением модуля и уменьшением числа зубьев обрабатываемого колеса и инструмента. Единственным технологическим условием является подготовка впадины зубьев перед окончательной нарезкой типа «протуберанец».

Расчёты показывают (рис. 1, *б*), что даже при восстановлении цилиндрических зубчатых колес с модулем $m = 40$ мм и числе зубьев колеса $Z_k = 30$ для обеспечения условий обработки достаточно иметь режущие кромки инструмента длиной $l_{кр} = 5...6$ мм.

Исходя из этого, была разработана технология восстановления зубьев чистовыми специальными фрезами. С учётом возможных погрешностей изготовления инструмента по углу профиля и величины срезаемого припуска длина режущих кромок зубьев не зависит от размеров обрабатываемых зубьев колеса и составляет $10...16$ мм. Впервые такие, но только быстрорежущие фрезы, названные фрезами «Победа», были предложены заслуженным изобретателем Украины; кандидатом технических наук А. К. Сидоренко [6; 7; 8].

Уменьшение размеров режущих кромок в $2...5$ раз, по сравнению со стандартными фрезами (рис. 2), позволило увеличить количество режущих элементов фрезы в $1,5...2$ раза, а также упростило процесс оснащения инструмента твёрдым сплавом и его алмазную заточку.

Особенность заточки обычных червячных модульных фрез состоит в относительно большой протяженности и криволинейности режущих кромок их зубьев.

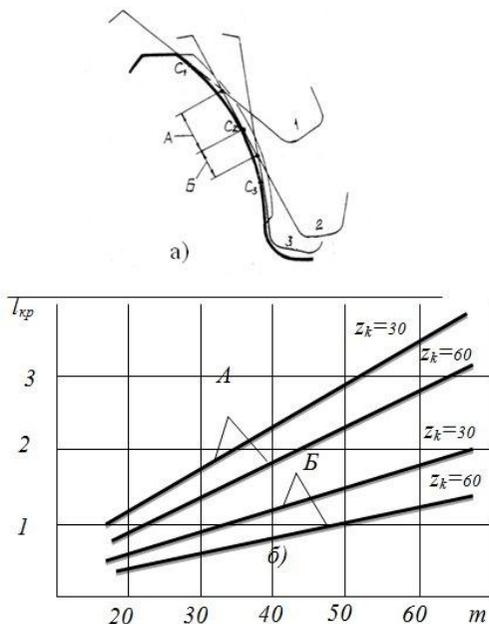


Рисунок 1 – К определению оптимальной длины главных режущих кромок специальной твердосплавной фрезы
 а – схема огибания кромками фрезы зуба колеса;
 б – зависимость длины кромки $l_{кр}$ от модуля и числа зубьев колеса

При заточке уменьшенных размеров режущих кромок требуется обеспечить движение поверхности круга точно по кромке. Чтобы сохранить фасонный профиль фрезы и упростить заточку, затылованные зубья затачиваются только по передней поверхности алмазными чашечными кругами. Острозаточенные зубья, имеющие прямолинейную или стандартизированную криволинейную форму, затачивают по задней поверхности.

Для изготовления фрез используют твердые сплавы. Твердые сплавы, из которых изготавливают зубья фрез, производятся в виде пластин стандартных размеров и форм, крепящихся к корпусу фрезы высокотемпературной пайкой (например, серебряным припоем ПСр-40) или с помощью резьбовых соединений (сборные фрезы). Они состоят из карбидов вольфрама, титана и тантала, связанных кобальтом. Фрезы, изготовленные из вольфрам-кобальтовых сплавов (ВК2, ВК3, ВК6, ВК6М, ВК8 и пр.), используются для обработки чугуна, цветных металлов, неметаллических материалов. Титаново-вольфрам-кобальтовые сплавы (Т5К10, Т15К6, Т14К8, Т30К4 и др.) менее прочны, чем сплавы типа ВК, но они имеют более высокую

износостойкость при обработке деталей из различных видов стали. Трехкарбидные сплавы, состоящие из карбидов вольфрама, тантала, титана и кобальта (ТТ7К12 и пр.), в основном также применяются для обработки.

При использовании алмазных кругов (PCD) желательно осуществлять их охлаждение СОЖ. Одним из существенных недостатков алмаза является сравнительно низкая температурная устойчивость – при температуре около 900°C алмаз сгорает.

Но, т.к. в конструкциях специальных фрез применяются укороченные длины режущих кромок при алмазной заточке, обеспечивается в зоне заточки пластин фрез температуру до 700-900°C. При использовании СОЖ на основе воды для охлаждения добавляют определенные электролиты (углекислый натрий, кальцинированная сода, тринатрийфосфат, нитрит натрия, силикат натрия и т.д.), которые образуют защитные пленки.

Окружная скорость круга при заточке твердосплавных зубьев должна быть около 10-18 м/с. Это означает, что при использовании круга диаметром 125 мм скорость вращения двигателя должна быть около 1500-2700 об/мин. При заточке твердосплавных инструментов применение жестких режимов приводит к образованию повышенных напряжений и трещин, а иногда и к выкрашиванию режущих кромок, при этом повышается износ круга .

При конструировании новых фрез для восстановления крупногабаритных цилиндрических зубчатых колёс в качестве паллоиды окружности станочного зацепления инструмента и детали может быть использована как делительная окружность, так и отличная от неё. В первом случае фрезы будут универсальными, пригодными для обработки колёс с любым числом зубьев; во втором – специальными, обрабатывающими колеса в определенном диапазоне чисел зубьев [9; 10].

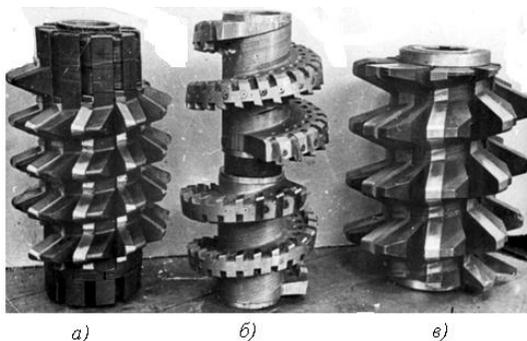


Рисунок 2 – Крупномодульные стандартные быстрорежущие червячные фрезы
а – остро заточенная фреза; $m = 20$ мм конструкции ВНИИинструмента;
б – остро заточенная фреза «Победа»; $m = 36$ мм;
в – затылованная фреза по нормали завода «Фрезер»; $m = 30$ мм

Особенность проектирования специальных червячных фрез заключается в том, что в качестве поллоиды станочного зацепления инструмента и детали используется окружность (рис. 3), проходящая через нижние граничные точки эвольвенты B и $B1$. При этом активные участки линий зацепления BE и $B1E1$ располагаются симметрично относительно межосевого перпендикуляра и на некотором от него расстоянии.

Угол профиля зубьев специальной фрезы α_k зависит от числа зубьев обрабатываемого колеса Z_k и определяется по зависимости

$$\alpha_k = \alpha_v - \sigma_v, \quad (1)$$

где α_v – угол давления в крайней нижней точке B эвольвенты;

σ_v – половина угловой толщины зуба по нижним граничным точкам B и $B1$ эвольвенты.

В диапазоне нарезаемых зубьев колеса $Z_k = 20 \dots 400$ угол профиля зубьев специальных фрез изменяется в пределах $\alpha_k = 5^\circ - 19^\circ$.

Каждой фрезой можно нарезать зубья колеса в определённом диапазоне чисел зубьев нарезаемого колеса: $Z_k = 33 \dots 49$; $Z_k = 46 \dots 66$; $Z_k = 60 \dots 88$; $Z_k = 88 \dots 134$; $Z_k = 134 \dots 204$. Технологическая установка фрез достигается путём разворота одного корпуса фрезы относительно другого на определённый расчётный угол и изменением толщины дистанционного кольца, закладываемого между корпусами. В каждом из корпусов фрезы выполняется несколько шпоночных пазов [3, 6, 8].

На рис. 4 приведены зависимости угла профиля зубьев специальной фрезы α_k от числа зубьев обрабатываемых колёс Z_k и коэффициента смещения исходного контура зубчатой рейки X [3; 6].

Область применения фрез поясняют рис. 5 и 6. Зубчатые некорректированные колёса с числом зубьев $33 \dots 49$ могут быть нарезаны фрезой с углом профиля $\alpha_k = 9^\circ$ и установкой корпусов фрезы с разворотом на угол θ .

$$\theta = 2z_K \beta_K,$$

где Z_k – число зубьев нарезаемого колеса;

$$\beta_K = \alpha_K - \alpha'_K,$$

где α'_K определяется из графика (рис. 4).

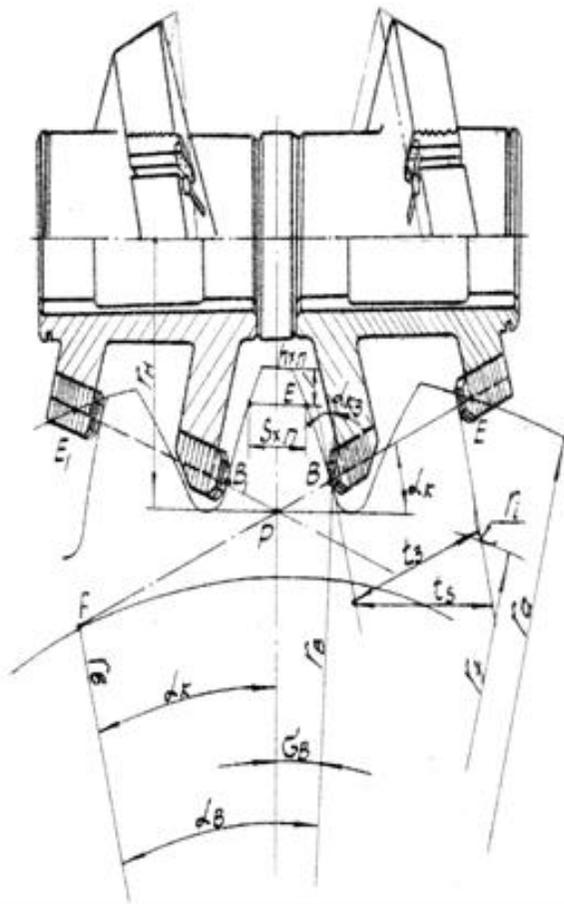


Рисунок 3 – Схема станочного зацепления специальной твердосплавной фрезы с обрабатываемым колесом

При установке на станке корпусов фрез, находящихся на оправке, корпуса фрез совмещают правыми резцами в одной плоскости и устанавливают на расстоянии S_{ϕ} , определяемом конусным шаблоном (рис 5, а), сопрягающимся с обоими первыми резцами фрезы по их боковому профилю. Измеряют внутреннее расстояние между торцами обоих корпусов фрезы и по нему подбирают дистанционное кольцо. Затем устанавливают корпуса фрезы на соответствующие шпоночные пазы и закрепляют их на оправке. Фрезу с оправкой устанавливают в суппорт станка с последующей настройкой относительно оси зуба колеса.

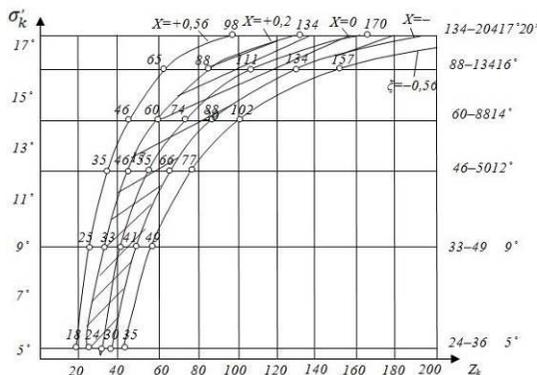


Рисунок 4 – График для определения применимости специальных твердосплавных фрез

Фрезы с заданным углом α_k могут быть использованы для нарезания колёс с другим числом зубьев, если ось зуба колеса отклоняется от оси станка (рис. 5, б) на угол β_k , а S_ϕ – расстояние между корпусами пересчитывается. При положительном β_k правый корпус фрезы поворачивается относительно левого по часовой стрелке на угол θ , если смотреть со стороны правого корпуса фрезы (рис. 5, с). При отрицательном β_k правый корпус фрезы поворачивается против часовой стрелки и в таком положении оба корпуса закрепляются на оправке.

Для корригированных колёс диапазон чисел нарезаемых зубьев увеличивается: при $X = +0,56$, применяя фрезу с $\alpha_k = 9^\circ$, нарезают зубчатые колёса с числом зубьев 25, а при $X = -0,56$ нарезают зубчатые колёса с числом зубьев 57.

Разворот корпусов фрез на угол θ осуществляется путём совмещения соответствующих шпоночных пазов в корпусах.

Конструктивно специальные затачиваемые твердосплавные фрезы (рис. 6) могут быть выполнены при модуле $m = 10...16$ мм со вставными рейками, на которых напаяны твердосплавные пластинки формы 0115А по ГОСТ 25395-82 длиной 16 мм, а при модуле $m = 18...65$ мм в витках корпусов фрез размещены вставные резцы с напаянными пластинками формы 01151 длиной 20 мм. Материал пластинок – твердый сплав марок ВК10-ОМ; ВК10-ХОМ по ГОСТ 3882-74.

Достоинство рассмотренных конструкций специальных червячных фрез в том, что они одновременно обоими корпусами обрабатывают обе боковые поверхности зубьев колеса. Усилия резания от обоих корпусов направлены навстречу друг другу, т. е. имеет место силовое замыкание внутри инструмента. Это способствует снижению вибраций и колебаний стола

станка вместе с обрабатываемым колесом. Значительным преимуществом технологии обработки спаренными фрезами является то, что обеспечивается рациональная геометрия формирования режущей части, по сравнению со стандартными фрезами. Передний угол резания может быть выполнен в диапазоне $\gamma = 0^\circ \div 10^\circ$; задний угол резания $\alpha = +5^\circ - +10^\circ$; угол наклона главной режущей кромки $\lambda = 0^\circ - 30^\circ$.

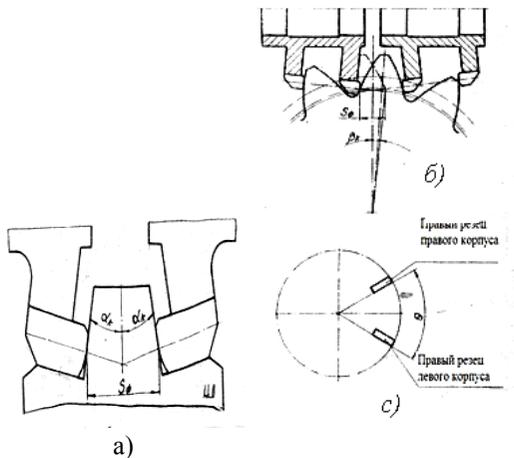


Рисунок 5 – Установка и настройка фрезы а – шаблон для установки корпусов; б – поворот колеса на угол β ; с – разворот корпусов фрезы на угол θ

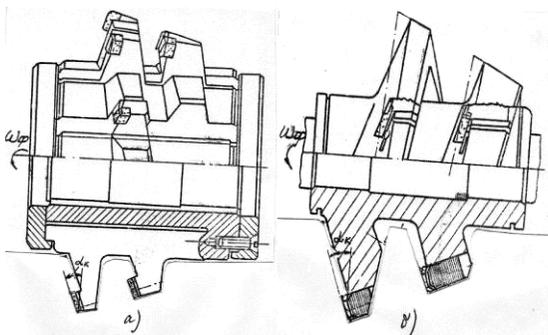


Рисунок 6 – Конструкция специальных твердосплавных фрез
 а – правый корпус фрез, $m = 0 - 16$ мм; со вставными зубчатыми рейками и напаянными пластинками;
 б – правый корпус фрез, $m = 18 \dots 65$ мм со вставными резцами и напаянными пластинками

Фрезы выполнены остро заточенными, т.е. алмазное затачивание и

перетачивание зубьев фрез ведётся только по задним граням. Это значительно уменьшает толщину срезаемого слоя, увеличивает количество возможных перетачиваний инструмента и снижает трудоёмкость затачивания и перетачивания фрез. Наиболее рациональной областью использования рассмотренных специальных фрез является восстановление крупногабаритных цилиндрических зубчатых колес, используемых в углеразмельных и рудоразмельных мельницах, экскаваторах, прокатных станах, механизмах подъёма.

Выводы

Для восстановления крупногабаритных зубчатых колес после наплавки с подслоиным слоем (однослойным или двухслойным) предложена конструкторско-технологическая схема формообразования зубьев специальными твердосплавными фрезами, которые обеспечивают значительное уменьшение длины главных режущих кромок и таким образом облегчают алмазную заточку инструмента. Одним из основных факторов при восстановлении цилиндрических зубчатых колёс является выбор оптимальной схемы резания и кинематики. Анализ технологических схем резания зубьев специальной твердосплавной червячной фрезой при восстановлении крупногабаритных зубчатых колес показывает, что в этом случае нет необходимости выполнять режущие кромки инструмента, соизмеримыми с размерами обрабатываемых зубьев колеса; т. к. не всей длиной кромки режущие зубья участвуют в резании. Рабочая длина режущей кромки определяется из условия обязательного обеспечения перекрытия резцов в процессе огибания эвольвентной поверхности зубьями фрезы и включает два участка, расположенные, соответственно, ниже и выше точки профилирования. Длина участков резания увеличивается с увеличением модуля и уменьшением числа зубьев обрабатываемого колеса и инструмента. Единственным технологическим условием является подготовка впадины зубьев перед окончательной нарезкой типа «протуберанец».

Исходя из минимальной длины режущей части фрез была разработана технология восстановления зубьев чистовыми специальными фрезами, у которых длина режущих кромок зубьев не зависит от размеров обрабатываемых зубьев колеса и составляет 10...16 мм с учётом возможных погрешностей изготовления инструмента по углу профиля и величины срезаемого припуска.

Список использованных источников: 1. Технологические способы повышения точности зубофрезерования универсальными червячными фрезами / Ю. В. Тимофеев, Е. В. Мироненко, А. А. Клочко, В. Ф. Шаповалов, О. Е. Мироненко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»: зб. наук. пр. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ ХПІ, 2010. – № 25. – С. 134–141. 2. Технология обработки крупномодульных закаленных зубчатых колес твердосплавными червячными фрезами / Ю. В. Тимофеев, Е. В. Мироненко, А. А. Клочко, В. Ф. Шаповалов, О. Е. Мироненко // Вісник

Национального технічного університету «Харківський політехнічний інститут»: зб. наук. пр. Тематичний випуск : Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ ХПІ, 2010. – № 40. – С. 109–123. **3.** О повышении эффективности процесса алмазного шлифования / *М.И. Гасанов, Ф.М. Євсюкова, О.В. Євсюкова, О.Ф. Єнікєєв* // Вестник Национального технического университета «ХПИ»- Харьков, 2001.-№ 14. С. 62-69. **4.** Технология зубообработки закаленных колес червячными фрезами с неперетачиваемыми поворотными пластинками и твердосплавными роликами / *Ю. В. Тимофеев, Е. В. Мироненко, А. А. Клочко, В. Ф. Шаповалов* // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2010. – Вып. 27. – С. 69–77. **5.** Оптимизация технологического процесса алмазного шлифования по критерию стоимости / *М.И. Гасанов, Ф.М. Євсюкова, О.Ф. Єнікєєв, І.С. Зыков* // Вестник Национального технического университета "ХПИ- Харьков, 2002.-№3. С. 83-90. **6.** Совершенствование технологии зубонарезания червячными модульными фрезами с контактно-реактивной пайкой режущих пластин / *Е. В. Мироненко, А. А. Клочко, В. Ф. Шаповалов, В. А. Чмырь* // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2013. – Вып. 33. – С. 3–7. **7.** Анализ схем резания и технологическое оснащение при интенсивной и высококачественной зубообработке закаленных крупномодульных колес / *Ю. В. Тимофеев, А.Н. Шелковой, Е. В. Мироненко, А. А. Клочко, А. Н. Кравцов* // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Серія : Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ». – 2014. – № 42(1085). – С. 7–19. **8.** Шелковой А.Н. Общая имитационная модель формирования погрешностей при зубообработке лезвийным инструментом / *А.Н. Шелковой, А.А. Клочко, С.Ю. Палашек, Т.В. Терещенко* // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку: матеріали тринадцятого Міжнар. наук.-техн. конф., 2–4 червня 2015 р. / за загал. ред. В. Д. Ковальова. – Краматорськ : ДДМА, 2015. – С. 93. **9.** Шелковой А.Н. Технологические условия формирования параметров поверхностного слоя зубчатых колес и их влияние на эксплуатационные свойства / *А. Н. Шелковой, А. А. Клочко, О.А. Анцыферова, С.Ю.Палашек* // Физические и компьютерные технологии. Труды 21-й Международной научно-практической конференции. 24–25 декабря 2015, г.Харьков. – Д.: Лира, 2015. –С. 107–120. – ISBN 978-966-383-658-4. **10.** Особенности эксплуатации абразивных кругов при зубошлифовании / *Ф.В. Новиков, А.А. Клочко, М.И. Гасанов, Е.В. Басова, А.Н. Лищенко* // Физические и компьютерные технологии. Труды 22-й Международной научно-практической конференции. 7–9 декабря 2016, г.Харьков. – Д.: Лира, 2016. –С. 110–112. – ISBN 978-966-383-795-6.

Bibliography (transliterated): **1.** Technological ways to improve the accuracy of gear milling with universal worm cutters / Yu. V. Timofeev, EV Mironenko, AA Klochko, VF Shapovalov, OE Mironenko / News of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute ": zb. sciences. Ave. Subject visas: Technologies in machinebuilding. - Khar'kov: NTU KhPI, 2010. – No. 25. – P. 134-141. **2.** Technology of processing coarse-grained hardened gears with carbide-tipped worm cutters / Yu. V. Timofeev, EV Mironenko, AA Klochko, VF Shapovalov, OE Mironenko / News of the National Technical University "Kharkovskiy Politehnicheskii Institute ": zb. sciences. Ave. Subject visas: Technologies in machinebuilding. – Khar'kov: NTU KhPI, 2010. – No. 40. – P. 109-123. **3.** On improving the efficiency of the diamond grinding process / M.I. Hasanov, F.M. Cvsyukova, O.V. Evsyukova, OF. Enikeev // Bulletin of the National Technical University "KhPI" - Kharkov, 2001.- № 14. P. 62-69. **4.** Technology of tooth-machining of hardened wheels with worm cutters with non-repivoted rotary plates and carbide-tipped rollers. Yu. V. Timofeev, EV Mironenko, AA Klochko, VF Shapovalov / Instrument reliability and optimization of technological systems: Sat. sci. tr. - Kramatorsk: DGMA, 2010. – Issue. 27. – P. 69-77. **5.** Optimization of the technological process of diamond grinding by the criterion of cost / M.I. Hasanov, F.M. Cvsyukova, OF Enikeev, I.S. Zыkov / Bulletin of the National Technical University "KhPG-Kharkov, 2002. – No 3. S. 83-90. **6.** Improvement of the technology of gear cutting with worm modular mills with contact-reactive soldering of cutting inserts / EV Mironenko, A. A. Klochko, V. F. Shapovalov, V. A. Chmyr // Instrument reliability and optimization of technological systems: Collection of scientific papers – Kramatorsk: DGMA, 2013. – Issue 33. – P. 3-7. **7.** Analysis of cutting schemes and technological equipment for intensive and high-

quality machining of hardened coarse-grain wheels / Yu.V. Timofeev, A.N. Shelkovoy, E.V. Mironenko, A. A. Klochko, A. N. Kravtsov / News of the National Technical University "Kharkiv Polytechnical Institute." Science: Technology in machinebuilding .– Kharkov: NTU "KhPI." – 2014. – No. 42 (1085) – P. 7-19. **8.** Shelkovoy A.N., Klochko A.A., Paslachek S.Y., Tereshchenko T.V. The general simulation model of the formation of errors in the processing of teeth with a blade tool. – Vazhke mashinobuduvannya. Problems that perspective are rooted in: the material of the triadnated Mizhnar. Sciences: -techn. conf., 2-4 draft of 2015 p. for the lock. Ed. VD Koval'ova. – Kramatorsk: DDMA, 2015. – P. 93. **9.** Shelkovoy A.N., Klochko AA, Antsyferova OA, Palashek S.Yu. Technological conditions for forming the parameters of the surface layer of gears and their effect on operational properties.– Physical and Computer Technologies. Proceedings of the 21st International Scientific and Practical Conference. December 24-25, 2015, Kharkiv. – D .: Lear, 2015. – C. 107-120. ISBN 978-966-383-658-4. **10.** Features of the operation of abrasive wheels with gear grinding / F.V. Novikov, A.A. Klochko, M.I. Gasanov, E.V. Basova, A.N. Lyshenko. – Physical and Computer Technologies. Proceedings of the 22nd International Scientific and Practical Conference. December 7-9, 2016, Kharkov. – D .: Lira, 2016. – P. 110-112. ISBN 978-966-383-795-6.

УДК 621.9

Ю.Г. Гуцаленко, В.В. Ивкин, Л.И. Пупань, Е.К. Севидова, И.И. Степанова
Харьков, Украина

ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ АНОДНО-ИСКРОВЫЕ ПОКРЫТИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ ПОСАДОЧНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ АЛМАЗНЫХ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ

У статті представлено виконана в НТУ «ХПИ» розробка локальних електроізоляційних захисних покриттів посадкових поверхонь корпусів з алюмінієвих сплавів шліфувальних кругів з алмазно-металевої композицією робочої частини. Наведено характеристики функціональності отриманих методом мікродугового оксидування анодно-іскрових корундових покриттів.

Ключові слова: алмазний шліфувальний круг, посадкова поверхня, діелектричний захист, алюмінієвий сплав, силікатно-лужний електроліт, мікродугове оксидування, довільно падаюча потужність, анодно-іскрове покриття, електрична міцність, товщина покриття, напруга пробою

В статье представлена выполненная в НТУ «ХПИ» разработка локальных электроизоляционных защитных покрытий посадочных поверхностей корпусов из алюминиевых сплавов шлифовальных кругов с алмазно-металлической композицией рабочей части. Приведены характеристики функциональности полученных методом микродугового оксидирования анодно-искровых корундовых покрытий.

Ключевые слова: алмазный шлифовальный круг, посадочная поверхность, диэлектрическая защита, алюминиевый сплав, силикатно-щелочной электролит, микродуговое оксидирование, произвольно падающая мощность, анодно-искровое покрытие, электрическая прочность, толщина покрытия, напряжение пробы

The article presents made in NTU "KPI" the development of local electrically insulating coatings for the seating surfaces of frameworks from aluminum alloys of grinding wheels with diamond-metal composition of the working part. The characteristics of the functionality of the anodic-spark corundum coatings received by a micro-arc oxidation are given.

Keywords: diamond grinding wheel, seating surface, dielectric protection, aluminum alloy, silicate-alkaline electrolyte, microarc oxidation, voluntary falling power, anodic-spark cover, electric strength, coating thickness, breakdown voltage

Введение. Одним из самых высокотехнологичных современных методов формообразования труднообрабатываемых материалов, в том числе особо твердого монокарбида вольфрама [1] и синтетических поликристаллических алмазов [2], является созданное и около полувека [3] разрабатываемое в НТУ «ХПИ» алмазно-искровое шлифование. Однако для его реализации на универсальном оборудовании до сих пор выполняется специальная электроизоляционная модернизация с приостановлением эксплуатации станка и переделом ответственного за его точность шпиндельного узла.

Индифферентные наличию токозащиты шпиндельного узла

шлифовального станка от корпуса конструкции алмазно-абразивных инструментов для комбинированных действием электрического тока в зоне резания методов обработки в национальной систематизации [4], мировой исследовательской, рекомендательной и производственной практике инструментов из сверхтвердых материалов до наших разработок не рассматривались. В НТУ «ХПИ» эти работы выполняются последние несколько лет [5]. Токозащиту металлических корпусов алмазных шлифовальных кругов предлагается осуществлять нанесением специально разработанных износостойких диэлектрических покрытий на основе семейства эпоксидно-диановых смол [6], а также электроизоляционным микродуговым оксидированием – для корпусных решений из алюминиевых сплавов.

Постановка исследования. В алюминиевых решениях корпусов алмазных шлифовальных кругов, массо-динамически эксплуатационно предпочтительных, традиционно [7] широко используется сплав АК6 (1360), в современной практике ведущего национального производителя – ПАТ «Полтавский алмазный инструмент» – также Д16 (2024), оба ГОСТ 4784-97, и некоторые другие.

В технологическом маршруте изготовления алмазных кругов операция анодно-искрового микродугового оксидирования должна выполняться до напрессовки на корпус алмазоносного слоя, чтобы обезопасить этот слой от преждевременных электрофизикохимических повреждений, и может осуществляться конвейерным способом с целью повышения производительности выхода покрытых корпусов.

Для бездефектной модернизации традиционных алмазных чашечных кругов в условиях потребителя предложена специальная оснастка круга перед погружением в емкость формирования анодно-искрового покрытия, исключаящая алмазно-металлическую композицию рабочей части шлифовального круга из электрической цепи микродугового оксидирования [8].

Мировая практика анодно-искровых покрытий по методу микродугового оксидирования различных вентильных металлов и сплавов на их основе, в том числе алюминиевой, обычно исходит из использования их износостойких, коррозионностойких и теплостойких свойств. Использования анодно-искровых покрытий в качестве диэлектрических не столь широко распространены и менее изучены, в особенности применительно к задачам точного размерного формообразования.

Однако известно, что в применении микродугового оксидирования к алюминиевым сплавам можно получить защитные анодно-искровые покрытия толщиной до 400 мкм, выдерживающие электрическое напряжение до 6000 В [9] при диэлектрических параметрах таких покрытий, близких

диэлектрикам высшего качества, причем возможным формированием в различных электролитах [10, 11].

Основу известного эффекта изменения размера в направлении формирования анодно-искрового покрытия обеспечивает захват атомов ионизированного в химически активный озон кислорода вентильным металлом поверхностного слоя объекта микродугового оксидирования [12], однако стехиометрическая трансформация металла поверхности в оксидную структуру развивается при этом разнонаправленно, в том числе вглубь исходного объекта, и линейный размерный прирост объекта чисто теоретически не предсказуем.

Из предшествующего исследовательского опыта применительно к алюминиевым и титановым сплавам нами также принято во внимание, что существенное влияние на конечный размерный эффект микродугового оксидирования оказывают прежде всего электрические параметры, время протекания процесса, состав электролита и исходный химический состав (выбор марки сплава) субъекта анодно-искрового покрытия.

Взаимосвязанные задачи изучения размерного эффекта приращенной поверхности алюминиевого корпуса шлифовального круга ее микродуговым оксидированием и показателей токозащиты формируемого электрически барьерного покрытия рассматриваются нами в связи с разработкой, испытанием, патентной защитой и предложением промышленности алмазно-абразивных инструментов новых конструкций. В них микродуговое оксидирование предусмотрено для поверхностей рабочих посадок в разъемных или в неразъемных сборочных соединениях, как это имеет место в технических решениях алмазных шлифовальных кругов с локальной токозащитой корпуса, разработанных на базе корпусных конструкций соответственно конвенционного универсального типа [13, 14] и специальной, заодно со шкивом рабочего привода [15], расширившей технологические возможности японского прототипа.

Для определения структуры и содержания технологического маршрута производства алмазно-абразивных инструментов предложенных конструкций необходим достоверный прогноз размерного и связанного с ним диэлектрического результата операции микродугового оксидирования, окончательной или с увязанной с нею предварительной (расточной) или последующей (доводочной) размерной обработкой.

При этом следует принимать во внимание, что если понижение некоторой расчетной толщины анодно-искрового покрытия со служебной функцией обеспечения, например, износостойкости принципиально не препятствует работоспособности детали, хотя и понижает ресурс высокофункциональной эксплуатации подвергнутой микродуговому оксидированию поверхности, то в задачах токозащиты проведение такого

понижения следует рассматривать с позиций риска доэксплуатационной выбраковки детали техническим контролем.

Исследования размерного эффекта микродугового оксидирования проведены применительно к характерным представителям алюминиевых сплавов Д16 и АК6, современно используемым отечественной инструментальной промышленностью в производстве корпусов алмазных шлифовальных кругов, и выполнены в условиях использования источников переменного электрического тока и с квазилинейной характеристикой тока (рис. 1), формирования анодно-искровых покрытий в типичных растворах щелочи, жидкого стекла и их комбинаций.

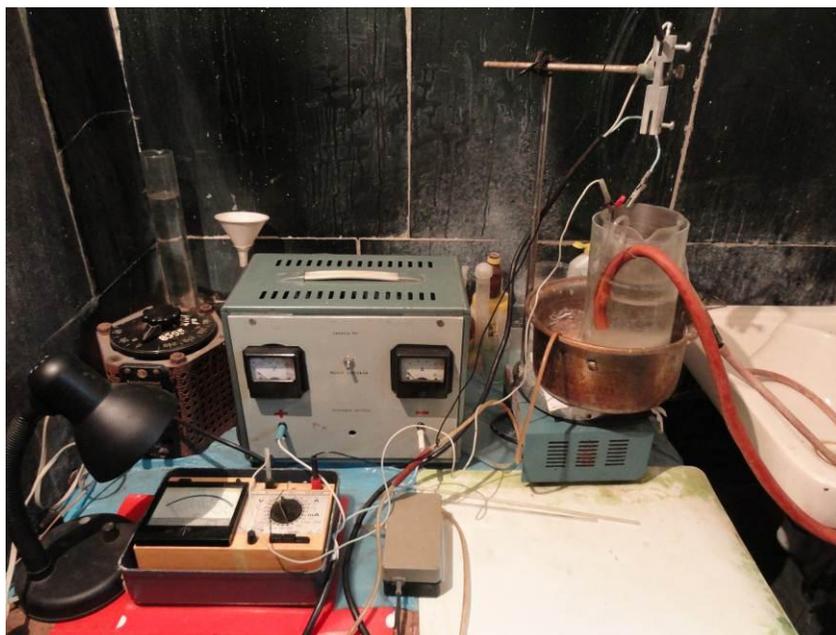


Рисунок 1 – Общий вид экспериментальной установки МДО

Основные результаты. Проведенными экспериментальными исследованиями установлено, что анодно-искровые покрытия толщиной 30...60 мкм, сформированные микродуговым оксидированием, обеспечивают объемное электрическое сопротивление (рис. 2) порядка $10^7...10^8$ Ом при напряжении пробоя 350...760 В.

Дальнейшее наращивание толщины покрытий приводит к снижению удельных показателей этих характеристик, соответственно удельного объемного сопротивления и электрической прочности.

При этом прирост исходных линейных размеров поверхностей с покрытиями составляет 50...85% от общей толщины сформированных на них алюмооксидов.

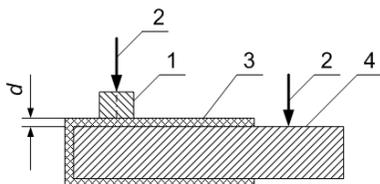


Рисунок 2 – Схема подключения электродов для измерения объемного электрического сопротивления покрытия: 1 – медная опора-токоприемник, 2 – пара щуповых электродов, 3 – корундовое покрытие толщиной d , 4 – материал алюминиевого сплава основы

Выявлено также, что режимом микродугового оксидирования с произвольно падающей мощностью обеспечиваются более высокие электрофизические показатели токозащиты в сравнении с гальваностатическим: по удельному объемному сопротивлению – в 1,5...2,5 раза, а по электрической прочности – в 1,4...2,1 раза, в зависимости от сплава и состава электролита.

Наилучшие показатели качества исследованных анодно-искровых покрытий на обоих сплавах и в обоих режимах микродугового оксидирования – наивысшие значения удельного объемного сопротивления и электрической прочности, наименьшую шероховатость и пористость поверхности – обеспечивает осуществление процесса в силикатно-щелочном электролите с композицией в нем «калиевая щелочь + жидкое стекло» (г/л) в соотношении 1 : 6.

Пористость анодно-искровых покрытий по методу микродугового оксидирования, прослеживаемая обычной микроскопической визуализацией (рис. 3), определяет их основной недостаток как электроизоляционных – ухудшение диэлектрических показателей со временем, особенно при выдержке во влажном воздухе. Аналогичная среда может возникать также в условиях шлифования с использованием технологических жидких сред. К сожалению, получить такие покрытия абсолютно без пор невозможно, поскольку это обусловлено сущностью самого процесса микродугового оксидирования, но можно минимизировать пористость за счет оптимизации технологических параметров.

Более радикальный эффект достижим при обработке поверхности покрытий после операции микродугового оксидирования полимерными материалами.



Рисунок 3 – Микроскопическая визуализация корундового покрытия на поверхности алюминиевого сплава (АК6) корпуса алмазного шлифовального круга при увеличениях (USB-микроскоп Supereyes B008): x4 (а, видна часть заводской маркировки инструмента); x100 (б, просматриваются выходы пористости на поверхность покрытия).

Установлено, что насыщение поверхностной пористости композицией на основе винилхлорида с низкой вязкостью позволяет в несколько раз повысить характеристики диэлектрической защиты и их устойчивость во влажной среде. Способ запатентован [16].

Заключение. По результатам выполненных исследований базовыми режимом и электролитом для изготовления опытно-экспериментальной партии инновационных алмазно-абразивных инструментов и разработки рекомендаций для промышленности приняты режим микродугового оксидирования с произвольно падающей мощностью и силикатно-щелочной электролит с композицией в нем «калиевая щелочь + жидкое стекло» (г/л) в соотношении 1 : 6.

Исследование размерного эффекта и электрически барьерных свойств поверхностей микродугового оксидирования в рамках разработки конструкций и технологий алмазных шлифовальных кругов с электроизоляционными анодно-искровыми покрытиями их корпусов из алюминиевых сплавов выполняется в в рамках НИР по проекту НТУ «ХПИ» ID 64244 от 26.08.2016 р. (№ регистрации 0109U007406) в плане научных исследований и разработок учреждений Министерства науки и образования Украины на 2017-2018 гг.

Список использованных источников: 1. Узуян, М. Д. Шлифование наноструктурных твердых сплавов / М. Д. Узуян, Р. М. Стрельчук. – Харьков : НТУ ХПИ, 2015. –182 с. 2. Руднев, О. В. Забезпечення якості двошарових алмазних пластин при алмазно-іскровому шліфуванні на основі аналізу приведеного профілю ріжучої поверхні круга : автореф. ... дис. канд. техн. наук : 05.03.01 – процеси механічної обробки, верстати та інструменти / О. В. Руднев [наук. кер. М. Д. Узуян]; Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – Х., 2017. – 24 с. [Дис. :

164 с.] **3. Гуцаленко, Ю. Г.** Алмазно-искровое шлифование: обзор сорокалетия разработки харьковской научной школы физики процессов резания / Ю. Г. Гуцаленко // Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве: Тр. 18-й междунар. науч.-практ. конф., 5-6 дек. 2012 г. – Харьков: ГП ХМЗ «ФЭД», 2012. – С. 79-88. **4. Богатырева, Г. П. Бурыкин В. В., Гаргин В. В. и др.** Инструменты из сверхтвёрдых материалов / Г. П. Богатырева, В. В. Бурыкин, В. В. Гаргин и др.; под ред. Н. В. Новикова и С. А. Клименко. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2014. – 608 с. **5. Гуцаленко Ю. Г.** Алмазно-искрове шлифування матеріалів високої функціональності: Моногр. [Електрон. ресурс] / Ю. Г. Гуцаленко. – 2-е вид., перероб. і допов. – Х.: Вид-во «Курсор», НТУ «ХПІ», 2017. – 289 с. [3,37 Мб] – Рос. мовою. – Код доступу online: <http://web.kpi.kharkov.ua/cutting/wp-content/uploads/sites/143/2017/12/dsghfm-monograph-ed.2.pdf>. **6. Гуцаленко, Ю. Г.** Композиція для електроізоляційних зносостійких покриттів: патент на корисну модель № 92786 Україна: МПК C08L 63/02 (2006.01), C08I 5/16 (2006.01) / Ю. Г. Гуцаленко, В. В. Івкін, О. В. Руднев, О. К. Севидова; власник: Нац. техн. ун-т «Харк. політехн. ін-т». – № u 2013 15441; заявл. 30.12.2013; опубл. 10.09.2014. Бюл. № 17. **7. Бакуль, В. Н.** Основы проектирования и технология изготовления абразивного и алмазного инструмента / В. Н. Бакуль, Ю. И. Никитин, Е. Б. Верник, В. Ф. Селех. – М.: Машиностроение, 1975. – 296 с. **8. Белозеров, В. В.** Модернизация алмазно-абразивных инструментов торцевого шлифования для технологий обработки с токоподводом на рабочую поверхность резания / В. В. Белозеров, Ю. Г. Гуцаленко, Е. К. Севидова, А. И. Махатилова // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доп. XXIV міжнар. наук.-практ. конф. (18-20 трав. 2016 р., Харків). – У 4-х ч. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – Ч. I. – С. 91. **9. Эльфельд, А. В.** Применение технологии микродугового оксидирования для формирования защитных покрытий / А. В. Эльфельд // Технология машиностроения. – 2004. – № 4. – С. 39-44. **10. Павлюс, С. Г.** Диэлектрические свойства анодно-искровых силикатных покрытий на алюминии / С. Г. Павлюс, В. И. Соборницкий, Ю. А. Шепрут [и др.] // Электронная обработка материалов. – 1987. – № 3. – С. 34-36. **11. Баковец, В. В.** Оксидные пленки, полученные обработкой алюминиевых сплавов в концентрированной серной кислоте в анодно-искровом режиме / В. В. Баковец, И. П. Долговесова, Г. Л. Никифорова // Защита металлов. – Т. 22 (1986). – № 3. – С. 440-444. **12. Суминов, И. В.** Микродуговое оксидирование (теория, технология, оборудование) / И. В. Суминов, А. В. Эльфельд, В. Б. Людин [и др.]. – М.: ЭКОМЕТ, 2005. – 368 с. **13. 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 «Харк. політехн. ін-т». – № u 2014 09394; заявл. 26.08.2014; опубл. 10.02.2015. Бюл. № 3. **14. Гуцаленко, Ю. Г.** Шліфувальний круг для обробки з комбінуванням механічних та електричних процесів в зоні різання: патент на корисну модель № 121852 Україна: МПК (2006) B24D 7/00, B24D 7/06 (2006.01), B24D 3/06 (2006.01) / Ю. Г. Гуцаленко, О. К. Севидова, О. В. Руднев, І. І. Степанова, В. В. Івкін; власник: Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – № а 2017 00078; заявл. 03.01.2017; опубл. 26.12.2017. Бюл. № 24. **15. Гуцаленко, Ю. Г.** Шліфувальний круг: патент на корисну модель № 117767 Україна: МПК (2006.01) B24D 5/16 / Ю. Г. Гуцаленко, О. К. Севидова, В. В. Білозеров, Г. І. Махатилова; власник: Нац. техн. ун-т «Харк. політехн. ін-т». – № u 2017 00074; заявл. 03.01.2017; опубл. 10.07.2017. Бюл. № 13. **16. Севидова, О. К.** Спосіб формування зносостійких електроізоляційних покриттів на сплавах алюмінію та титану: патент на корисну модель № 111473 Україна: МПК (2016.01) C25D 11/00, C25D 11/04 (2006.01), C25D 3/54 (2006.01) / О. К. Севидова, І. І. Степанова, Ю. Г. Гуцаленко, К. М. Алексєєв; власник: Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – № u 2016 05063; заявл. 06.05.2016; опубл. 10.11.2016. Бюл. № 21.

Bibliography (transliterated): 1. Uzunyan, M. D., and R. M. Strelchuk. Shlifovanie nanostrukturnykh tverdykh splavov. Kharkov, NTU "KhPI", 2015. 182 p. Print. 2. Rudnev, O. V. Zabezpechennya yakosti dvosharovykhalmaznykh plastyn pryalmazno-iskrovomu shlifuvanni na osnovi analizu pryvedenoho profilyu rizhuchoyi poverkhni kruha: Avtoref. ... dys. kand. tekhn. nauk: 05.03.01 – protsesy mekhanichnoyi obrobky, verstaty ta instrumenty / O. V. Rudnev; Nat. Tech. Univ. "Kharkov Polytechnic Inst.". – Kharkov, 2017. – 24 p. Print. 3. Gutsalenko, Yu. G. "Almazno-iskrovoe

shlifovanie: obzor sorokaletija razrabotki har'kovskoj nauchnoj shkoly fiziki processov rezanija". Fizicheskie i komp'yuternye tehnologii v narodnom hozjajstve: Tr. 18-j mezhdunar. nauch.-prakt. konf. 5th-6th Dec. 2012. Kharkov: GP HMZ "FED", 2012. Print. **4.** Bogatyireva, G. P., et al. Instrumenty iz sverhtvyordijih materialov. Ed. N. V. Novikov and S. A. Klimenko. Moscow: Mashinostroenie, 2014. 608 p. Print. **5.** Gutsalenko, Yu. G. Almazno-iskrove shlifuvannya materialiv visokoї funkcional'nosti. 2-nd ed. Kharkov, Cursor, NTU «KhPI», 2017, Web, 289 p., 3.37 Mb, in Russian, <<http://web.kpi.kharkov.ua/cutting/wp-content/uploads/sites/143/2017/12/dsghfm-monograph-ed.2.pdf>>. **6.** Gutsalenko, Yu. G., et al. Kompozicija dlja elektroizoljacionih znosostyjkijh pokryttiv: patent na korisnu model'. No.92786 Ukraine. IPC, 2006.01 C08L 63/02, C08J 5/16. No. u 2013 15441. Appl. 30.12.2013. Publish. 10.09.2014. Bull. No. 17. Print. **7.** Bakul', V. N., et al. Osnovy proektirovaniya i tehnologiya izgotovleniya abrazivnogo i almaznogo instrumenta. Moscow: Mashinostroenie, 1975. 296 p. Print. **8.** Belozerov, V. V., et al. "Modernizaciya almazno-abrazivnyh instrumentov torcevoogo shlifovaniya dlja tehnologij obrabotki s tokopodvodom na rabochuyu poverhnost' rezanija". Informatsiyi tehnologiyi: nauka, tehnika, tehnologiya, osvita, zdorov'ya: materiali XXIV mizhnar. nauk.-prakt. konf. (18-20 travnya 2016 r., Kharkov). Kharkov: NTU "KhPI", 2016. Part. 1, p. 91. Print. **9.** Jepel'fel'd, A. V. "Primenenie tehnologii mikrodugovogo oksidirovaniya dlja formirovaniya zashhitnyh pokrytij". Tehnologija mashinostroeniya. 2004. No. 4. 39-44. Print. **10.** Pavljus, S. G., et al. "Dijelektricheskie svojstva anodno-iskrovnyh silikatnyh pokrytij na aljuminii". Jelektronnaja obrabotka materialov. 1987. No. 3. 34-36. Print. **11.** Bakovec, V. V., I. P. Dolgovesova, and G. L. Nikifrova. "Oksidnye plenki, poluchennye obrabotkoj aljuminievyh splavov v koncentrirovannoj sernoj kislothe v anodno-iskrovom rezhime". Zashhita metallov. Vol. 22 (1986). No. 3. 440-444. Print. **12.** Suminov, I. V., et al. Mikrodugovoe oksidirovanie (teoriya, tehnologiya, oborudovanie). Moscow: EKOMET, 2005. 368 p. Print. **13.** 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. **14.** Gutsalenko, Yu. G., et al. Shlifival'nyy kruh dlja obrobky z kombinuvannam mekhanichnykh ta elektrychnykh protsesiv v zoni rizannya: patent na korisnu model'. No. 121852 Ukraine. IPC (2006), B24D 7/00, B24D 7/06 (2006.01), B24D 3/06 (2006.01). No. u 2017 00078. Appl. 26.12.2017. Bull. No. 24. Print. **15.** Gutsalenko, Yu. G., et al. Shlifival'nij krug: patent na korisnu model'. No. 117767 Ukraine. IPC, 2006.01 B24D 5/16. No. u 2017 00074. Appl. 03.01.2017. Publish. 10.07.2017. Bull. No. 13. Print. **16.** Sevidova, O. K., et al. Sposib formuvannya znosostyjkijh elektroizolyatsyinyh pokryttiv na splavah alyuminiyu ta titanu: patent na korisnu model'. No.111473 Ukraine. IPC, 2016.01 C25D 11/00, C25D 11/04 (2006.01), C25D 3/54 (2006.01). No. u 2016 05063. Appl. 06.05.2016. Publish. 10.11.2016. Bull. No. 21. Print.

УДК 621.91

В.Л. Доброскок, д-р техн. наук, Е.В. Островерх, канд. техн. наук,
Н.Ф. Наконечный, канд. техн. наук, Ю.Б. Витязев, канд. техн. наук,
Харьков, Украина

КЛАССИФИКАЦИЯ ИНТЕГРИРОВАННЫХ ПРОЦЕССОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

В статье представлена классификация интегрированных процессов механической обработки материалов, основанная на терминологии, общепринятой в теории и технологии размерного формообразования на базе комплексов признаков – энергетических, технологических, инструментальных и формообразующих.

Ключевые слова: классификация, интегрированные процессы, метод обработки, обработка материалов резанием

У статті наведено класифікацію інтегрованих процесів механічної обробки матеріалів, заснована на термінології, загальноприйнятою в теорії і технології розмірного формоутворення на базі комплексів ознак – енергетичних, технологічних, інструментальних і формотворчих.

Ключові слова: класифікація, інтегровані процеси, метод обробки, обробка матеріалів різанням

The classification of integrated processes of material machining, based on the terminology common in the theory and technology of dimensional shaping on the basis of the complexes of features – energy, technological, tool and shaping ones is presented in the paper.

Keywords: classification, integrated processes, processing method, material machining by cutting

К настоящему времени в мировой практике металлообработки разработано большое количество методов обработки деталей.

По своей сущности методы обработки усложнились. Интенсивность протекания процессов разрушения, деформирования, преобразования материала деталей значительно возросла. В разработке и совершенствовании методов обработки имеет место тенденция одновременного воздействия на обрабатываемые заготовки и детали механических нагрузок и химических веществ, теплового или магнитного полей, электрической и лучевой энергии, энергии элементарных частиц и т. д. в различном их сочетании.

Все большее внимание уделяется развитию и совершенствованию методов обработки со съемом относительно небольших слоев металла и создание на поверхности и в поверхностном слое необходимых физико-механических свойств и шероховатости. Это объясняется непрерывным

совершенствованием методов получения заготовок, уменьшением припусков на механическую обработку, ростом требований к точности и необходимостью повышения качества и эксплуатационных свойств деталей и изделий, применением в машиностроении новых конструкционных материалов.

Отмечается стремление к существенному повышению скорости резания и микрорезания (скоростная, сверхскоростная обработка); дальнейшее развитие нетрадиционных методов обработки. Определенное влияние на совершенствование методов обработки оказывает развитие интегрированных технологий.

Многообразие разработанных и применяемых в технологии машиностроения методов обработки, необходимость решения вопросов автоматизации технологического проектирования ставят задачу систематизации имеющихся в этой области сведений. Известно, что одни и те же детали могут быть обработаны по различным технологическим схемам, при многовариантном сочетании методов обработки.

В связи с этим представляет интерес систематизация и схематизация существующих методов обработки, выявление общих характерных признаков и классификация их на этой основе в соответствующие группы и классы. Такое построение значительно упрощает изучение и использование методов обработки, полнее выявляет их взаимосвязь и возможности совершенствования и развития. Классификация методов обработки создает предпосылки для их формализации и алгоритмизации, что является важным условием автоматизации технологического проектирования. Кроме того, разработав основные принципы построения и развития методов обработки, можно перейти от описательного метода изложения и изучения методов обработки к изучению методологии, основ их разработки.

Под методом обработки понимают комплекс условий, характеризующих взаимодействие обрабатываемой среды или инструмента и обрабатываемой заготовки (детали), используемых для одной или совокупности технологических задач: изменения формы, размеров и взаимного расположения элементов детали, состояния и свойств ее материала, поверхности и поверхностного слоя [1]. Метод обработки определяется видом используемой энергии (механической, химической, электрической, тепловой и др.), производительностью, сущностью процесса формообразования (например, со съемом материала или пластическим деформированием), типом применяемого инструмента или обрабатываемой среды и их характеристиками, кинематикой процесса и его схемой [2]. Изменение одного из перечисленных факторов вызывает изменение в названии и содержании метода обработки.

Создание интегрированных методов обработки основывается на одновременном или последовательном использовании различных видов

энергии и вызываемых ими соответствующих физических эффектов [3], способов подвода в зону обработки, совмещения воздействия различных инструментов, комбинирования кинематических схем [4].

Рациональное использование интегрированных методов обработки приводит к повышению, как производительности обработки, так и качества детали. Кроме того, в ряде случаев освоение интегрированных методов обработки позволяет достигнуть новых технических результатов, например, значительно увеличить прочность, износостойкость и другие эксплуатационные характеристики деталей, а также достичь синергетического эффекта проявляющегося в превышении результирующих показателей над аддитивной суммой отдельных составляющих.

1 Принципы систематики

Отличительные признаки различных интегрированных технологий механической обработки основываются, в первую очередь, на физико-химических и технологических особенностях процессов снятия припуска и формирования обработанной поверхности деталей.

В настоящее время по принципу интеграции механической обработки с дополнительным физико-химическим воздействием на процесс удаления припуска создано и достаточно успешно реализовано большое количество технологий. Их перечень гораздо шире, чем число относимых непосредственно к обработке материалов резанием. Имеется практическая необходимость в использовании комбинированных (комплексных) способов эффективной обработки материалов резанием и пластическим деформированием непосредственно на металлообрабатывающих станках.

Поэтому представляется целесообразным и необходимым разработать классификацию интегрированных процессов обработки материалов резанием на более широкой основе, тем более, что существующая ограниченная классификация, в настоящее время характеризует лишь занятую технологическую нишу в различных отраслях производства и не является исчерпывающей, а разнообразие способов обработки требует осознанного выбора той или иной технологии.

Предлагаемая классификация интегрированных процессов резания материалов основана на терминологии, общепринятой в теории и технологии размерного формообразования. Такая классификация позволит приблизить понятие «интегрированные процессы резания» к разряду существующих технологических процессов изготовления, используя для этого подходы и критерии, принятые в машиностроении. Добавление признаков, определяемых спецификой рассматриваемых процессов, даст возможность более полно оценить технологические возможности интегрированных технологий и отдельных способов их реализации.

На основе проведенного анализа интегрированных процессов

механической обработки, прежде всего процессов обработки материалов резанием, выделены комплексы признаков – энергетических, технологических, инструментальных и формообразующих. В рамках этих комплексов классификационные признаки разбиты на 18 групп, каждая из которых содержит от 3 до 12 признаков. Часть их заимствована [5, 6] с добавлением или изменением отдельных показателей признаков.

2 Комплекс энергетических признаков

В первую очередь обращено внимание на энергетический аспект процессов. В энергетический комплекс признаков включено 5 групп:

- вид энергии, непосредственно подводимой к объекту;
- энергия, определяющая образование формы;
- распределение энергии во времени;
- подвод энергии и распределение ее в пространстве, занимаемом объектом;
- энергоемкость процесса формообразования.

2.1 Вид энергии, непосредственно подводимой к объекту

Группа 1 характеризует вид энергии, непосредственно подводимой к объекту или на границе объекта и окружающей среды: 1.1 – механическая (энергия механического движения и взаимодействия тел или их частей); 1.2 – тепловая (энергия, связанная с движением атомов, молекул или других частиц, из которых состоит какое-либо вещество); 1.3 – электрическая (энергия электромагнитного поля, слагающаяся из энергии электрического поля и энергии магнитного поля); 1.4 – магнитная (энергия магнитного поля); 1.5 – электростатическая (потенциальная энергия взаимодействия электрических зарядов); 1.6 – химическая (энергия системы из двух или более реагирующих между собой веществ); 1.7 – лучевая (лазерная – энергия лазерного луча; светолучевая – энергия светового луча видимого света); 1.8 – ядерная.

Объектом могут являться: обрабатываемая деталь (заготовка); инструмент; зона непосредственного контакта инструмента с деталью.

Во всех случаях применительно к интегрированным процессам резания обязательным условием является наличие подвода исходной механической энергии. Дополнительный подвод различных видов энергии может существенно повышать выходные показатели процесса.

Примеры использования дополнительных видов энергии.

• Механическая энергия.

Резание с опережающим пластическим деформированием [7]. Резание с опережающим пластическим деформированием (ОПД) обеспечивает улучшение условий стружкообразования путем рационального изменения физико-механических свойств материала срезаемого слоя вследствие его

упрочнения до процесса срезания. Упрочнение осуществляют накатным устройством, создающим глубину и степень наклепа, необходимые для получения максимальной эффективности последующего процесса резания. Энергия подводится к заготовке.

Ультразвуковое резание [7]. Ультразвуковыми методами обработки называют способы, использующие ультразвуковые колебания; они могут применяться в качестве основного воздействия для снятия, материала (например, размерная ультразвуковая обработка) или в сочетании с другими видами воздействия (механическими, электрическими, химическими) как средство интенсификации какого-то другого метода обработки (например, механические, электрохимические или другие виды обработки с наложением на инструмент вибраций ультразвуковой частоты). Ультразвуковые колебания наиболее широко применяют для размерной обработки твердых и сверхтвердых материалов по любому сложному профилю, для очистки, пайки, дефектоскопии и других технологических процессов, а также для улучшения процессов обработки резанием. Ультразвуковыми называют упругие механические колебания с частотой, равной или выше $16 \div 18$ кГц. При ультразвуковом резании энергия подводится к инструменту.

Абразивная обработка шлифованием и хонингованием с наложением вибраций [7]. Подвод механической энергии в виде колебаний к обрабатываемой детали, инструменту или СОТС улучшает эти операции. Это объясняется повышением равномерности загрузки отдельных абразивных зерен, лучшим доступом СОТС и удалением продуктов обработки.

Повышение интенсивности съема металла при абразивной обработке с вибрациями объясняется постоянной сменой рабочих граней, скоростей и углов резания, большим динамическим взаимодействием зерен и обрабатываемого материала, а также увеличением плотности сетки следов абразивных зерен на обрабатываемой поверхности. Все это ведет к снижению действующих сил и температур, а, следовательно, повышению производительности обработки и качества поверхности; при этом ликвидируются самоотпуск материала поверхности детали, микротрещины, интенсивный наклеп.

• **Тепловая энергия.** *Резание с нагревом заготовки* [7]. Одним из средств улучшения обрабатываемости резанием является искусственный подогрев материала срезаемого слоя заготовки до определенной температуры. Этот метод обработки эффективен, прежде всего, для обработки сталей и сплавов высокой прочности, тугоплавких материалов, а также нержавеющей и жаропрочных материалов. Другим подходом является искусственное охлаждение зоны резания.

• **Электрическая энергия.**

Введение электрического тока в зону резания при лезвийной обработке [7]. Подвод электрической энергии в зону резания является эффективным

средством улучшения обрабатываемости высокопрочных и твердых сталей. При обработке этих материалов на контактных поверхностях наблюдаются условия, близкие к сухому трению; при этом взаимодействие трущихся пар происходит по химически чистым поверхностям. В этом случае физическое состояние контактной пары инструмент - заготовка можно искусственно изменить путем ввода в зону резания электрического тока низкого напряжения. Электрический ток, распределяясь в зоне контакта инструмента и заготовки пропорционально контактным электрическим напряжениям, выделяет дополнительное количество тепла. Вследствие образования тонкой пластичной пленки создается полусухое трение, снижается коэффициент трения, повышается площадь истинного контакта трущейся пары. Пропускание электрического тока приводит к интенсификации процессов образования окисных пленок на поверхностях трения; кроме того, как разрыв электрической цепи, так и введение электрического тока оптимального направления и величины повышает эффективность процесса резания.

Формообразование рабочей поверхности абразивных инструментов на токопроводящих связках в процессе работы [8].

Возможны три схемы регулирования интенсивности принудительного удаления токопроводящей связки круга в процессе шлифования. **Совмещенная схема.** Этой схеме соответствуют метод электроабразивного шлифования. Его суть заключается в том, что между токопроводящим кругом и токопроводящей обрабатываемой заготовкой пропускается регулируемый электрический ток. Тогда к основному процессу абразивного резания добавляется электрическая энергия, направленная на повышение эффективности процесса. В зависимости от материала зерен (абразив, алмаз, кубонит), вида электрического тока (постоянный, переменный или импульсный), полярности (прямая – круг – катод, обратная – анод) и подаваемой в зону резания жидкости (электролит, диэлектрик) сформировались названия вариантов электроабразивного шлифования. Например: электрохимическое, электрохимическое, электроалмазное, алмазно-искровое и др. Все эти способы в той или иной мере позволяют регулировать воздействие на связку круга. Ограничением их технологических возможностей является обработка только токопроводящих заготовок. **Автономная схема.** Этой схеме соответствует воздействие на связку круга вне зоны резания, что позволяет ее использовать при шлифовании нетокопроводящих сверхтвердых поликристаллов и др. диэлектриков. В качестве метода формообразования связки целесообразно использовать электрохимический. Он позволяет выполнять формообразование на станке в процессе шлифования при отсутствии износа электрода инструмента. **Комбинированная схема** объединяет совмещенную и автономную схемы.

• **Магнитная энергия.** *Магнитно-абразивная обработка.* Обработка деталей в магнитном поле ферромагнитными порошками является примером

интегрированного метода обработки, в котором сочетается механическое воздействие с использованием энергии магнитного поля. По своему воздействию на обрабатываемую поверхность метод магнитно-абразивной обработки можно отнести к финишным – полирование с элементами упрочнения поверхностного слоя.

• **Электростатическая энергия.** *Ионно-плазменные процессы нанесения износостойких покрытий на режущий инструмент* [6]. Изменением величины электростатического поля управляют энергией ионов, что позволяет осуществлять десорбцию, миграцию поверхностных атомов и химические реакции, распыленность и имплантацию, делать очистку, синтезировать покрытие или модифицировать свойства поверхностного слоя изделия.

• **Химическая энергия.** *Применение СОТС с химически активными компонентами.* Технологическая эффективность СОТС определяется комплексом его функциональных действий (эффектов) непосредственно в процессе механической обработки – смазочного, диспергирующего, охлаждающего, моющего. Смазочное действие СОТС заключается в его экранирующем и антифрикционном эффектах вследствие образования на контактирующих поверхностях режущего инструмента и обрабатываемой заготовки вторичных структур. Диспергирующее действие СОТС проявляется как на обрабатываемой заготовке, так и в зоне контакта между заготовкой и инструментом, и определяется его высокой поверхностной активностью – способностью непосредственно в зоне разрушения эффективно снижать поверхностную энергию (работу образования новой поверхности) обрабатываемого твердого тела (заготовки). Моющее действие СОТС проявляется в физико-химических, механических и гидродинамических процессах (отделение дисперсных продуктов от поверхностей заготовки и инструмента, стабилизация продуктов диспергирования и предотвращение их последующей десорбции заготовкой, инструментом или элементами системы применения СОТС). С помощью охлаждающего действия СОТС, определяемого его теплофизическими свойствами и гидродинамическими условиями в зоне обработки, обеспечивается дополнительный отвод тепла из зоны обработки и, как следствие, – снижение контактных температур и особенно температур режущего инструмента и заготовки [9].

• **Лучевая (лазерная – энергия лазерного луча; светолучевая – энергия светового луча видимого света).**

Резание лезвийным инструментом с локальным нагревом заготовки перед зоной резания лучом лазера.

Формообразование рабочей поверхности абразивного инструмента (правка) лучом лазера.

• **Ядерная энергия.** Ядерное воздействие на современном уровне исследований практически не изучено, хотя имеются сведения о

положительном влиянии облучения на интенсивность резания труднообрабатываемых материалов, повышение предела усталостной прочности деталей, работающих при знакопеременных нагрузках [10]. Есть основания считать, что под действием излучения происходят физические процессы на уровне атомов и молекул вещества, изменяющие внутреннюю энергию и напряжения, что может быть использовано для технологических целей в интегрированных процессах обработки. Ожидаемой областью их применения могут быть финишные операции ультрапрецизионной точности на базе интегрированных процессов нанорезания. Однако в настоящее время примеры применения ядерной энергии при размерной обработке материалов отсутствуют. Кроме этого, при облучении необходимо учитывать возможное воздействие этого явления на окружающую среду, и требуются особые меры защиты персонала и создание дорогостоящих изолированных участков, требующих существенных затрат.

2.2 Энергия, определяющая образование формы

Группа 2 характеризует энергию, определяющую сьем материала и физический механизм формообразования: 2.1 – механическая (базовый вид энергии при механической обработке); 2.2 – тепловая (энергия, выделяющаяся при деформации обрабатываемого материала и работе сил трения); 2.3 – химическая (химические процессы между обрабатываемой поверхностью детали и инструментом и/или средой обработки); 2.4 – энергия фазовых переходов; 2.5 – ядерная энергия.

Примеры известных проявлений различных видов энергии [3] применительно к процессам образования формы при интегрированном формообразовании (вид энергии – форма движения материи – вид проявления).

• Механическая энергия при формообразовании:

- движение твердых тел (перемещение, вращение, колебание);
- направленное движение тел и частиц (движение режущее-деформирующего инструмента, абразивных частиц; движение жидкости, газа, молекул, атомов, элементарных частиц);
- турбулентное движение частиц (движение в жидкостях, газах, плазме);
- волновые возмущения (акустические и поверхностные волны);
- упругая деформация тел (изгиб, растяжение, кручение твердых тел; сжатие твердых тел, жидкостей, газов, плазмы);
- пластическая деформация;
- хрупкое разрушение;
- межмолекулярное и межатомное взаимодействие (межмолекулярные и межатомные силы поверхностного натяжения и капиллярности на границе раздела сред, молекулярные силы сорбции).

• **Тепловая энергия при формообразовании:**

– хаотическое тепловое движение молекул и атомов (перемещение, вращение, колебание);

– тепловое движение частиц при смещении тел (смещение твердых тел, жидкостей, газов; твердых тел и жидкостей, жидкостей и газов, твердых тел и газов; смещение твердых тел, жидкостей и газов)

– тепловое движение электронов (возбуждение электронных орбит в твердых телах, жидкостях и газах);

– тепловое движение зарядов (смещение зарядов плазмы, электронно-позитронного газа, мезонного и электронно-мезонного газа).

• **Химическая энергия при формообразовании:**

– химические реакции соединения (окисление, рекомбинация, нейтрализация, полимеризация, гидратация, образование гиперфрагментов, ионизация с присоединением электрона или иона);

– химические реакции разложения (разложение молекул и полимеров, диссоциация, ионизация в процессе разложения, дегидратация);

– химические реакции замещения (замещение в электролитах, кристаллах и на границе раздела сред);

– химические реакции перехода веществ из возбужденного состояния в основное (переход твердых тел, жидкостей и газов).

• **Энергия фазовых переходов:**

– фазовые переходы первого рода (изменение агрегатного состояния и кристаллической структуры, растворение и выпаривание кристаллов);

– фазовые переходы второго рода (переход в сверхпроводящее состояние и обратно, переход ферромагнетиков в парамагнетики и обратно, переход гелия-I в гелий-II и обратно, поляризация и деполяризация диэлектриков);

• **Ядерная энергия:**

– синтез ядер (спонтанный, управляемый, импульсный, комбинированный);

– деление ядер (спонтанное, управляемое, импульсное, комбинированное);

– радиоактивные превращения (при захвате ядром электрона с К-оболочкой, при изомерных переходах, при испускании γ -квантов, радиоактивный распад);

– аннигиляция (лептонов, бозонов, гиперфрагментов, атомов, молекул, макросистем).

2.3 Распределение энергии во времени

Группа 3 определяет характер поступления энергии к объекту: 3.1 – непрерывный, в течение всего процесса (нагрев-охлаждение); 3.2 – пульсирующий, регулярно изменяющий свою величину при неизменности направления действия; 3.3 – импульсный (воздействие, признак или параметр

которого представляет собой импульс или последовательность импульсов, т. е. имеют место временные интервалы отсутствия подачи энергии).

Применительно к обработке резанием: пульсирующий подвод механической энергии соответствует случаям периодического изменения глубины резания (неравномерность припуска) и др.; импульсный – при обработке прерывистых поверхностей или со специальным импульсным нагружением инструмента, например, ударное сверление хрупких материалов.

Применительно к интегрированным методам обработки с подачей дополнительной электрической энергии признаки данной группы соответствуют характеристикам электрического тока, подаваемого в зону формообразования; использующим луч лазера – характеристикам лазерного излучения.

2.4 Подвод энергии и распределение ее в пространстве, занимаемом объектом

Группа 4 определяет характер подвода и распределения энергии: 4.1 – точечный (воздействие отдельных абразивных частиц); 4.2 – линейный (криволинейный – воздействие режущего лезвия инструмента; обработка сканированием поверхности лазером непрерывного действия); 4.3 – поверхностный (опережающий нагрев обрабатываемого материала, деформационное выглаживание поверхности детали; электрохимическое формообразование рабочей поверхности шлифовальных кругов в процессе работы); 4.4 – объемный (термическая обработка); 4.5 – точечно-линейный (воздействие отдельных закреплённых абразивных частиц, где линия – траектория их движения; сканирование поверхности импульсным лазером); 4.6 – точно-поверхностный (интегрированное воздействие отдельных абразивных частиц на обрабатываемую поверхность и др.); 4.7 – точно-объемный (интегрированное тепловое воздействие отдельных абразивных частиц на поверхностный слой обрабатываемой детали).

Признаки этой группы учитывают интеграцию в одном процессе нескольких видов подвода энергии. Так, например, обработка свободными абразивными частицами, электроэрозийные и ультразвуковые методы, характеризуются точечным (в физическом смысле) подводом энергии, но вследствие того, что частоты точечных воздействий велики, интегральная картина явления определяется уже результатом статистики массового воздействия на обрабатываемую поверхность. Этим методам обработки соответствует точно-поверхностный подвод энергии.

2.5 Энергоемкость процесса формообразования

Группа 5 характеризует удельную энергоемкость процесса, соответствующую трем энергетическим уровням, связанным с фазовыми переходами первого рода (изменение агрегатного состояния): 5.1 – низкая (до

энергии плавления); 5.2 – средняя (энергия плавления — энергия испарения); 5.3 – высокая (выше энергии испарения).

Первый энергетический уровень включает методы, при которых нарушаются силы связи только между относительно небольшой частью молекул и атомов. Поэтому при первом энергетическом уровне (верхней границей является энергия плавления материала объекта обработки) для преодоления сил связи требуются сравнительно малые энергии. Типичными представителями этой группы будут методы пластического деформирования и обработки резанием (строгание, точение, сверление, фрезерование, протягивание, микрорезание, шлифование, суперфиниширование, доводка) [4]. Второй энергетический уровень включает виды обработки с диапазоном энергий от величины плавления до величины испарения. Типичными представителями второй группы будут методы электрофизической обработки (электроконтактная, электроимпульсная, электроэрозионная, электроискровая). Третий энергетический уровень превышает энергию испарения обрабатываемого материала. Сюда относятся электрохимический и лучевой (лазерный или светолучевой) методы обработки.

3 Комплекс технологических признаков

В первую очередь комплекс характеризует технологические особенности процессов. В технологический комплекс признаков включено 2 группы: вид среды обработки; давление среды обработки.

3.1 Вид среды обработки

Под средой обработки (рабочей средой) будем понимать вещество, заполняющее пространство, непосредственно примыкающее к обрабатываемой детали и инструменту. Для контактных методов обработки (резание и пластическое деформирование) среду обработки принято называть смазочно-охлаждающей технологической средой (СОТС) или смазочно-охлаждающей жидкостью (СОЖ). В ряде случаев для интегрированных процессов обработки среда обработки может выполнять функции инструмента. Например, гидроструйное и гидроабразивное резание и др.

Для бесконтактных методов обработки, работающих с гарантированным зазором между инструментом и деталью – рабочей средой. К бесконтактным методам обработки относятся отдельные методы физико-химической обработки (например, электрохимическая и электроэрозионная).

Среда обработки может быть газообразной, жидкой и твердой (по агрегатному состоянию вещества) или представлять собой дисперсную систему. Дисперсные системы, состоят из множества частиц какого-либо тела (дисперсная фаза), распределенных в однородной среде (дисперсионной среде). Характеризуются сильно развитой поверхностью раздела между фазами. Примеры: эмульсия (частицы масла в жидкости); суспензия (твердые частицы в жидкости); туман (частицы жидкости в газе); дым, пыль (твердые

частицы в газе).

Группа 6 характеризует среду обработки и может быть следующих видов: 6.1 – воздух; 6.2 – инертные газы; 6.3 – химически активные газы; 6.4 – вакуум; 6.5 – вода техническая; 6.6 – электролиты; 6.7 – диэлектрические жидкости (масла, керосин); 6.8 – расплавы легкоплавких металлов; 6.9 – эмульсии; 6.10 – суспензии; 6.11 – пылевидные частицы; 6.12 – твердые смазки (дисульфид молибдена и др.).

3.2 Давление среды обработки

Группа 7 определяет относительный уровень давления среды обработки: 7.1 – пониженное (нанесение износостойких вакуумно-плазменных покрытий на режущий инструмент); 7.2 – нормальное (атмосферное); 7.3 – повышенное (подача СОЖ при обработке резанием); 7.4 – высокое (прокачка электролита в межэлектродном зазоре при размерной электрохимической обработке); 7.5 – особо высокое (гидроструйное и гидроабразивное резание).

4 Комплекс инструментальных признаков

Комплекс инструментальных признаков в первую очередь ориентирован на базовые процессы механической обработки с учетом возможности их интегрирования с электро-физико-химическими воздействиями.

Понятие «инструмент» в интегрированных технологиях не всегда идентичен такому же понятию в традиционных технологиях, например, роль «инструмента» может выполнять луч лазера, струя жидкости и др.

В комплекс инструментальных признаков включено 7 групп:

- конструктивные элементы инструмента;
- конструктивные признаки инструмента;
- соотношение процессов резания и пластического деформирования;
- виды рабочих движений инструмента;
- характер рабочих движений инструмента;
- скорость рабочих движений инструмента;
- жесткость рабочей части инструмента.

Уровень и производительность процессов механической обработки в большой мере определяются используемым инструментом.

Инструмент — орудие человеческого труда или исполнительный механизм машины. По принципу использования различают следующие виды инструмента: 1 – ручной, 2 – станочный (машинный), 3 – механизированный (ручные машины), 4 – измерительный (контрольно-измерительный), 5 – вспомогательный. Далее будем рассматривать только станочный (машинный) инструмент.

Инструмент станочный (машинный) – исполнительный элемент станка (машины) непосредственно взаимодействующий с обрабатываемым объектом (заготовкой, деталью).

Инструмент станочный (машинный) является съемным (сменным) элементом (т. е. заменяемым элементом) для его замены в случае износа или необходимости изменения его разновидности в связи с особенностями задач обработки. Износ инструмента может быть нормальным (достижение заданного критерия износа) или катастрофическим (поломка или разрушение инструмента).

4.1 Конструктивные элементы инструмента

Группа 8 характеризует тип конструктивных элементов: 8.1 – режущие или деформирующие элементы; 8.2 – присоединительные элементы (с базовыми поверхностями); 8.3 – вспомогательные элементы; 8.4 – объединяющий элемент.

Рассмотрим более подробно элементы инструмента [11] с учетом того, что при соответствующем конструктивном выполнении режущее лезвие функционально трансформируется в деформирующий элемент. В общем случае режущие или деформирующие элементы можно рассматривать как рабочие элементы, т. е. непосредственно участвующие в процессе обработки.

Режущие элементы (элементарные резцы) содержат режущие лезвия и предназначены для осуществления процесса резания. Это зубья, пластины из инструментальных материалов (в том числе сменные многогранные), ножи, вставки, элементарные резцы и т. п. Заметим, что в отличие от других элементарных резцов зубья конструктивно не оформлены и не имеют собственных присоединительных элементов. Зубья характерны для цельных инструментов, в то время как конструктивно оформленные элементарные резцы характерны для сборных инструментов с разъемным соединением,

Присоединительные элементы с установочными базовыми поверхностями предназначены для установки, базирования, присоединения и крепления режущего инструмента к станку или приспособлению, а также для передачи сил, моментов и движений. Это державки, оправки, «ласточкины хвосты», цилиндрические и конические хвостовики, базовые отверстия и торцы, шпоночные пазы и т. п.

Вспомогательные элементы служат для размещения, отвода, разделения стружки; размещения и крепления режущих элементов; направления инструмента во время работы; его наладки и регулировки; подвода СОТС и др. Вспомогательные элементы могут быть отдельными деталями или частью цельной конструкции. К ним относятся: стружечные канавки и уступы; накладные стружколомы; стружкоразделительные канавки; пазы; прихваты; штифты; винты; клинья; компенсаторы; направляющие и т. п.

Объединяющий элемент предназначен для размещения режущих и других элементов с объединением их в единое целое. Как правило, у сборных инструментов объединяющим элементом является корпус, а у цельных — та или иная условно выделяемая промежуточная часть между элементами.

В состав перечисленных конструктивных элементов входят ограничивающие их поверхности и линии (геометрические элементы), например, передняя и задняя поверхности, режущая кромка, базовые поверхности.

Кроме того, принято выделять также составные части инструмента, каждая из которых является совокупностью тех или иных элементов.

Режущая часть содержит режущие элементы, не участвующие в процессе формообразования. Она служит только для срезания припуска, ее кромки не соприкасаются с заданной чертежом поверхностью детали. Режущую часть иногда называют «заборной» (от понятия «забирать» обрабатываемый материал).

Калибрующая часть содержит режущие элементы, участвующие в процессе формообразования и формирующие поверхность обрабатываемой детали с заданными размерами и свойствами.

Совокупность режущей и калибрующей частей называют *рабочей частью* режущего инструмента. Наличие всех указанных элементов и составных частей не всегда обязательно. Например, иногда отсутствуют вспомогательные элементы, калибрующая часть совпадает с режущей частью и т. п.

4.2 Конструктивные признаки инструмента

Группа 9 характеризует конструктивные признаки инструмента по целостности и виду соединения частей и элементов: 9.1 – цельный или монолитный (инструмент, изготовленный из одной заготовки); 9.2 – составной (инструмент с неразъемным соединением его частей и элементов); 9.3 – сборный (инструмент с разъемным соединением его частей и элементов, которые в свою очередь могут быть как цельными, так и составными).

Составной режущий инструмент или элемент может быть сварным, клееным, паяным и др. (т. е. может использоваться любое, конструктивно и технологически оправданное, неразъемное соединение).

Особым случаем формирования рабочей части инструмента является нанесение износостойких покрытий или наваривание инструментального материала (неразъемное соединение).

4.3 Соотношение процессов резания и пластического деформирования

Группа 10 характеризует тип инструмента по соотношению процессов резания и /или пластического деформирования: 10.1 – режущий инструмент; 10.2 – режуще-деформирующий инструмент; 10.3 – деформирующе-режущий инструмент; 10.4 – деформирующий инструмент.

• **Режущий инструмент.** Для этого типа инструментов преобладающим является процесс резания — снятие стружки при несущественных остаточных

деформациях поверхностного слоя детали. Режущий инструмент принято разделять на лезвийный (резцы, фрезы, сверла, зенкеры, развертки, протяжки, прошивки и др.) и абразивный (шлифовальные круги, сегменты, бруски и др.). В результате механической обработки резанием поверхностные слои пластически деформируются при их превращении в стружку, что сопровождается их упрочнением (наклепом) и формированием в них остаточных напряжений.

• **Режуще-деформирующий инструмент.** Такой тип инструмента совмещает в себе режущие и деформирующие элементы. Например, режуще-деформирующая протяжка, метчик-раскатник и др.

• **Деформирующе-режущий инструмент.** Для инструментов этого типа преобладающим является процесс пластической деформации сопутствующий фрикционным явлениям. Например, пилы и ленты для фрикционной резки материалов, иглофрезы.

Фрикционная резка является примером положительного использования тепловых явлений [7]. Процесс фрикционного резания быстро вращающимся диском осуществляется путем разупрочнения обрабатываемого материала, под действием выделяющегося при трении тепла. Относительно низкая теплопроводность жаропрочных, нержавеющей сталей и титановых сплавов способствует применению этого метода, так как повышает локализацию температуры в зоне резания, увеличивая степень размягчения и разупрочнения; вращение диска создает его надежное охлаждение.

Иглофреза представляет собой специальную конструкцию плотной проволочной щетки [12]. Иголфрезы используют не только для очистки, но и при определенных условиях, для съема значительных слоев металла (до 4 мм за один проход). Отличительной особенностью иглофрез является большая плотность ворсовой части. Собранная под большим давлением ворсовая часть иглофрезы обладает большой жесткостью. При работе иглофрез ворсинки в силу значительной плотности и взаимного расположения отклоняются лишь на небольшой угол, представляя собой своеобразный полужесткие деформирующе-режущие элементы.

• **Деформирующий инструмент.** Такой тип инструмента имеет только деформирующие элементы и в процессе его работы стружка не образуется. Примеры деформирующих инструментов: выглаживатели (сферические – трение скольжение, шариковые или роликовые – трение качения); накатники для накатки рифлений (прямых или сетчатых); ролики резьбовые для формирования наружной резьбы; раскатники для формирования внутренней резьбы; сверла для фрикционного бесстружечного сверления.

Группы 11÷13 расширяют понятие рабочих движений инструмента.

4.4 Виды рабочих движений инструмента

Группа 11 характеризует виды движений в системе координат изделия:

11.1÷11.3 – прямолинейное по осям X, Y, Z ;

11.4÷11.6 – вращательное вокруг осей X, Y, Z .

Общая классификация схем резания применительно к механической обработке поверхностей впервые была разработана Г.И. Грановским [13]. Кинематические схемы учитывают возможные комбинации двух движений: вращательного и поступательного. На этой основе классифицированы все возможные, в том числе и не нашедшие практического применения, принципиальные кинематические схемы резания (по группам): I – одно прямолинейное движение; II – два прямолинейных; III – одно вращательное; IV – одно вращательное и одно прямолинейное; V – два вращательных; VI – два прямолинейных и одно вращательное; VII – два вращательных и одно прямолинейное движение; VIII – три вращательных движения.

4.5 Характер рабочих движений инструмента

Группа 12 характеризует характер отдельных рабочих движений и их комбинаций по виду траектории результирующего движения и характеру изменения скорости: 12.1 – прямолинейное параллельное одной из координатных осей; 12.2 – прямолинейное параллельное одной из координатных плоскостей; 12.3 – прямолинейное пространственное (траектория – прямая линия); 12.4 – криволинейное плоское (траектория лежит в одной плоскости); 12.5 – криволинейное пространственное; 12.6 – поступательное; 12.7 – возвратно-поступательное; 12.8 – циклическое; 12.9 – осциллирующее; 12.10 – вероятностное; 12.11 – фрактальное; 12.12 – отсутствует.

Вероятностный тип движений имеет место при обработке свободным абразивными частицами. Фрактальное движение — может использоваться для уменьшения температурных деформаций при генеративных (аддитивных) методах формообразования.

4.6 Скорость рабочих движений инструмента

Группа 13 характеризует скорости рабочих движений:

13.1 – низкая; 13.2 – средняя; 13.3 – высокая.

Уровень скоростей рабочих движений инструмента целесообразно согласовать со скоростями при традиционной обработке резанием: низкая – менее 10^{-5} м/с соответствует уровню линейных скоростей износа инструмента; средняя – 10^{-5} ÷1 м/с – применяемым скоростям подачи; высокая – более 1 м/с — скоростям резания. Значения интервалов в достаточной мере условны с учетом существенной разницы скоростей рабочих движений при лезвийной и абразивно-алмазной обработке.

4.7 Жесткость рабочей части инструмента

Группа 14 характеризует условную жесткость рабочих элементов инструмента: 14.1 – жесткий (режущий и деформирующий инструмент);

14.2 – полужесткий (иглофрезы); 14.3 – маложесткий (инструмент для полирования и финишной обработки); 14.4 – условно нежесткий (струйная или струйно-абразивная обработка, магнитно-абразивной обработка, виброабразивная обработка)

5. Комплекс признаков формообразования

Комплекс формообразующих признаков был рассмотрен как замыкающий и включает в себя 4 группы:

- метод размерного формообразования;
- главный физический процесс, определяющий размерное формообразование;
- характер формообразования;
- состояние части материала объекта, удаленного в процессе формообразования.

5.1 Элементы теории формообразования

Вопросы формообразования поверхностей резанием достаточно подробно рассмотрены П.Р. Родиным [14] и Б.А. Перепелицей [11].

Механическая обработка состоит из двух взаимосвязанных процессов: процесса срезания припуска и процесса формообразования.

Формообразование – это образование требуемой формы детали, определяемой геометрическим характером и взаимным расположением ограничивающих ее поверхностей, а также параметрами макро- и микрогеометрии.

Если рассматривать задачу чисто геометрически, без учета сил, тепловых явлений, износа инструмента и технологических особенностей процесса, то формообразование – это получение заданных чертежом поверхностей детали.

Формообразование осуществляют формообразующие элементы (точки, линии или поверхности), принадлежащие инструменту и контактирующие с поверхностью детали при обработке. При обработке резанием формообразующими являются точки или линии на режущих кромках, а при обработке давлением формообразующими являются рабочие поверхности инструментов. Формообразующая поверхность используется и при резании, но лишь условно, в качестве промежуточной инструментальной поверхности. Непосредственный контакт с поверхностью детали осуществляют контактные элементы, расположенные на формообразующих элементах. Контактными элементами могут быть точки, линии или поверхности. Контактный элемент может быть фиксированным (неизменно расположенным) на формообразующем элементе, текущим (изменяющим положение) или полностью совпадающим с формообразующим элементом.

В процессе формообразования инструмент совершает относительно

обработанной детали формообразующие движения и, контактируя с поверхностью детали своими формообразующими элементами, производит формообразование.

Таким образом, процесс формообразования включает в себя:

- деталь с ограничивающими ее поверхностями (поверхность детали Д);
- инструмент с формообразующими элементами (исходная инструментальная поверхность И);
- формообразующие движения ФД (кинематика формообразования).

Методы формообразования могут различаться типами формообразующего и контактного элементов (поверхность, линия, точка); формообразующим движением; характером контактирования (непрерывное или прерывистое) и другими признаками.

5.2 Метод размерного формообразования

Предлагаемая классификация методов размерного формообразования является достаточно условной и не заменяет классификации [11, 14], направленные в первую очередь, на проектирование сложно-профильных режущих инструментов. Методы размерного формообразования можно разбить на три подгруппы: копирования, кинематический и комбинированный [5].

Группа 15 определяет метод формирования формообразующих поверхностей детали: 15.1 – копирования (а – формы и размеров инструмента, б – только формы); 15.2 – кинематический (точечный); 15.3 – комбинированный.

• *Размерное формообразование методом копирования.*

Метод копирования объединяет процессы формообразования, в которых форма инструмента является определяющей. В этом случае формообразующая (калибрующая) часть инструмента рассматривается как линия или поверхность. В одних случаях (а) на детали копируется форма и размеры (мерный инструмент), в других – только форма инструмента (б).

Примеры процессов получения заданной формы и размеров только за счет геометрии инструмента (а):

- протягивание, деформирующее протягивание, прошивание, дорнование внутренних поверхностей (ФД – прямолинейное);
- нарезание наружной резьбы плашками круглыми, накатывание – резьбонакатными роликами (ФД: вращательное и прямолинейное, обеспечиваемое конструкцией инструмента);
- накатывание наружной резьбы плашками плоскими (ФД: вращательное и прямолинейное, обеспечиваемое конструкцией инструмента);
- нарезание внутренней резьбы метчиками, раскатывание – метчиками-раскатниками (ФД: вращательное и прямолинейное, обеспечиваемые конструкцией инструмента);

- сверление, зенкерование, развертывание, зенкование, цекование, доводка цилиндрических отверстий (ФД: вращательное и прямолинейное);
- доводка конических отверстий (ФД: вращательное).

Примеры процессов получения заданной формы и размеров за счет геометрии инструмента и заданного относительного расположения детали и инструмента (б):

- строгание, долбление, протягивание наружных поверхностей (ФД – прямолинейное);
- нарезание резьбы резцами и гребенками (ФД: вращательное и прямолинейное);
- фрезерование канавок цилиндрических прямозубых зубчатых колес профильными дисковыми и пальцевыми фрезами (ФД: вращательное и прямолинейное);

• Кинематический метод размерного формообразования.

Кинематический метод объединяет процессы обработки поверхностей для случая, когда форма инструмента не является определяющей. В таких случаях формообразующая (калибрующая) часть инструмента рассматривается как точка, имеющая заданную траекторию движения относительно детали – форма инструмента не рассматривается, т. к. не оказывает влияния на поверхность детали. Формообразующая точка – точка контакта калибрующего элемента инструмента с поверхностью детали. Положение такой точки в инструментальной системе координат будет постоянным для случая обработки плоскостей и тел вращения с прямоугольной образующей.

Примеры процессов получения заданной формы и размеров за счет траектории движения формообразующей точки инструмента:

- строгание плоских поверхностей (ФД – два прямолинейных);
- точение и растачивание цилиндрических поверхностей (ФД: вращательное и прямолинейное);
- точение и растачивание конических поверхностей (ФД: вращательное и два прямолинейных);
- фрезерование плоскостей торцовыми фрезами (ФД: вращательное и прямолинейное).

• Комбинированный метод размерного формообразования.

Комбинированный метод объединяет процессы формообразования, в которых форма поверхности детали образуется в результате совмещения копирования исходной инструментальной поверхности и заданных формообразующих движений. Комбинированный метод отличается от метода копирования добавлением еще одного формообразующего движения.

Одной из разновидностей комбинированного метода формообразования является метод обкатки при обработке зубчатых колес. При обработке методом обкатки поверхности зубьев получаются в результате обработки

инструментом, режущие кромки которого представляют собой профиль сопряженной рейки или профиль зуба сопряженного колеса, и во время обработки инструмент с заготовкой образует сопряженную (правильно зацепляющуюся) зубчатую пару.

Примеры процессов формообразования комбинированным методом:

- точение и растачивание фасонных поверхностей с непрямолинейной образующей (ФД: вращательное и два прямолинейных);
- фрезерование винтовых канавок дисковыми фрезами (ФД: вращательное и одно или два прямолинейных);
- фрезерование сложных поверхностей фасонными пальцевыми фрезами (ФД: вращательное и три прямолинейных).

Примеры процессов формообразования комбинированным методом обкатки:

- фрезерование зубчатых колес и шлицевых валов червячными фрезами (ФД: два вращательных и одно прямолинейное);
- зубодобление – строгание зубьев инструментом в виде зубчатого колеса (долбяка), контур торца зубчатого венца которого служит режущей кромкой (ФД: два вращательных и одно прямолинейное);
- шевингование зубчатых колес дисковым шевером – многолезвийным инструментом в виде зубчатого колеса с лезвиями на боковых поверхностях его зубьев, для обработки боковых поверхностей зубьев, при которой для осуществления резания используется относительное скольжение (ФД: два вращательных);
- шлифование эвольвентных зубьев тарельчатыми кругами (ФД: вращательное и прямолинейное).

5.3 Главный физический процесс, определяющий размерное формообразование.

Группа 16 характеризует основные физические процессы, определяющие размерное формообразование (размерный съем материала, размерную деформацию, размерное соединение частиц и т. п.): 16.1 – пластическая деформация; 16.2 – хрупкое разрушение (скалывание); 16.3 – плавление (отвердевание); 16.4 – испарение (конденсация); 16.5 – химическое растворение; 16.6 – электролиз растворов или расплавов; 16.7 – кристаллизация из растворов или расплавов; 16.8 – направленное взаимодействие наэлектризованных или намагнитченных частиц; 16.9 – взаимодействие диспергированных частиц и связывающих материалов; 16.10 – ядерные преобразования вещества.

При обработке резанием лезвийным и абразивным инструментом будут иметь место пластическая деформация и хрупкое разрушение. В случае полирования или доводки может иметь место химическое воздействие активных сред. Поверхностно-упрочняющая обработка (деформирующее

протягивание, выглаживание, раскатка и др.) – пластическая деформация. Интегрированные методы обработки с использованием дополнительных физико-химических воздействий могут включать в себя процессы плавления, испарения и химические реакции и др. Аддитивные (генеративные) методы могут включать в себя процессы, связанные с добавлением материала при размерном формообразовании.

5.4 Характер формообразования

Группа 17 характеризует основной процесс формообразования: 17.1 – удаление материала заготовки; 17.2 – изменение расстояния между точками твердого тела; 17.3 – нанесение (наращивание) материала.

Удаление материала заготовки соответствует процессам обработки материалов резанием. Изменение расстояния между точками твердого тела – методам поверхностно-упрочняющей обработки (деформирующее протягивание, выглаживание, раскатка и др.). Нанесение (наращивание) материала соответствует методам генеративных (аддитивных) технологий. В контексте рассматриваемых вопросов – это нанесение износостойких покрытий на инструмент и защитно-декоративные покрытия поверхности детали для защиты от коррозии и придания эстетического внешнего вида.

5.5 Состояние части материала объекта, удаленного в процессе формообразования

Применительно к интегрированным процессам обработки в качестве обрабатываемого объекта может выступать как обрабатываемая деталь, так и инструмент. Например, при формообразовании (правке) рабочей поверхности шлифовальных кругов объект – инструмент.

Группа 18 определяет физическое состояние части материала объекта, удаленного в процессе формообразования (состояние «стружки») [5]: 18.1 – твердое (обработка резанием лезвийным и абразивным инструментом с закрепленными режущими элементами); 18.2 – твердое диспергированное (обработка резанием хрупких материалов, обработка свободными абразивными зёрнами); 18.3 – в расплаве (при использовании в качестве СОТС расплавов); 18.4 – в жидком растворе (при электрохимическом растворении); 18.5 – капельно-жидкое (при введении электрической энергии с протеканием электроэрозионных процессов); 18.6 – парообразное (при введении лучевой энергии); 18.7 – газообразное ионизированное (при введении электрической энергии с протеканием электроэрозионных процессов); 18.8 – газообразное нейтральное (при введении лучевой энергии); 18.9 – исходное состояние не изменяется (обработка резанием и пластическим деформированием); 18.10 – «стружка» отсутствует (обработка пластическим деформированием).

Знание конечного состояния отходов позволяет составить

энергетический баланс процесса формообразования [5]. Чем выше энергосодержание «стружки» (газ, пар, жидкое состояние, твердое диспергированное вещество и т. д. по степени снижения внутренней энергии), тем более энергоемок процесс в целом.

Энергоемкость процесса формообразования интегрированными методами обработки имеет тенденцию к снижению в следующих случаях:

– чем меньше материала заготовки переходит в «стружку» и чем ниже ее энергосодержание;

– чем меньше изменений вносится в материал изделия по сравнению с исходным материалом заготовки;

– чем меньше происходит потеря энергии в окружающую среду.

Предложенная классификация позволяет с единых позиций рассматривать и оценивать характеристики различных интегрированных процессов обработки материалов. Классификационные признаки и их группирование, не заменяют, а дополняют различные существующие системы классификации отдельных процессов, методов и способов обработки материалов.

Список использованных источников: 1. Сущность и технологические возможности комбинированных методов обработки: Конспект лекций / *А.П. Бабичев, Ю.П. Анкудимов, Т.Н. Рысева, М.А. Тамаркин*. – Ростов н/Д: РИСХМ, 1990. – 74 с. 2. Интегрированные процессы обработки материалов резанием: учебник [для высш. учебн. заведений] / *А.И. Грабченко, В.А. Залоза, Ю.Н. Внуков* и др.; под общ. ред. *А.И. Грабченко* и *В.А. Залози*. – Сумы: Университетская книга, 2017. – 451 с. 3. Физические эффекты в машиностроении: Справочник / *В.А. Лукьянец, З.И. Алмазова, Н.П. Бурмистрова* и др.; Под общ. ред. *В.А. Лукьянца*. – М.: Машиностроение, 1993. – 224 с. 4. *Ермаков Ю.М.* Комплексные способы эффективной обработки резанием: Библиотека технолога. – М.: Машиностроение, 2005. – 272 с. 5. Электроимпульсная обработка металлов / *А.Л. Лившиц, А.Т. Кравец, И.С. Рогачев, А.Б. Сосенко*. – М.: Машиностроение, 1967. – 294 с. 6. Интегрированные генеративные технологии: учеб. пособие [для студ. выс. учеб. заведений] / *А.И. Грабченко, Ю.Н. Внуков, В.Л. Доброскок* [и др.]; под ред. *А.И. Грабченко*. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2011. – 416 с. 7. *Подураев В.Н.* Резание труднообрабатываемых материалов. – М.: Высш. школа, 1974. – 587 с. 8. Основы теории резания материалов: учебник [для высш. учебн. заведений] / *Мазур Н.П., Внуков Ю.Н., Грабченко А.И., Доброскок В.Л., Залоза В.А., Новоселов Ю.К., Якубов Ф.Я.*; под общ. ред. *Н.П. Мазура* и *А.И. Грабченко*. – 2-е изд., перераб. и дополн. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2013. – 534 с. 9. Машиностроение. Энциклопедия: В 40 т. / Машиностроение. – М., 2000. – Т. III-3: Технология изготовления деталей машин / *А.М. Дальский, А.Г. Суслов, Ю.Ф. Назаров* и др.; Под общ. ред. *А.Г. Суслова*. – 840 с. 10. *Смоленцев Е.В.* Проектирование электрических и комбинированных методов обработки. – М.: Машиностроение, 2005. – 511 с. 11. *Перепелица Б.А.* Автоматизированное профилирование режущих инструментов (теория и алгоритмы): Учебное пособие. – Харьков: ХПИ, 1985. – 107 с. 12. *Ермаков Ю.М.* Состояние и тенденции развития комбинированных способов механической обработки. – М.: ВНИИТЭМР, 1985. – 48 с. 13. *Грановский Г.И.* Кинематика резания. – М: Машгиз, 1948. – 200 с. 14. *Родин П.П.* Основы проектирования режущих инструментов: Учебник. – К.: Выща шк., 1990. – 424 с.

Bibliography (transliterated): 1. Sushhnost' i tehnologicheskie vozmozhnosti kombinirovannykh metodov obrabotki: Konspekt lektsii / *A.P. Babichev, Ju.P. Ankudimov, T.N. Ryseva, M.A. Tamarkin*. – Rostov n/D: RISHM, 1990. – 74 s. 2. Integrirovannye processy obrabotki materialov rezaniem: uchebnik [dlja vyssh. uchebn. zavedenij] / *A.I. Grabchenko, V.A. Zaloga, Ju.N. Vnukov* i dr.; pod obshh. red. *A.I. Grabchenko* i *V.A. Zalogi*. – Sumy: Universitetskaja kniga, 2017. – 451 s. 3. Fizicheskie

jeffekty v mashinostroenii: Spravochnik / V.A. Luk'janec, 3.I. Almazova, N.P. Burmistrova i dr.; Pod obshh. red. V.A. Luk'janca. – M.: Mashinostroenie, 1993. – 224 s. 4. Ermakov Ju.M. Kompleksnyye sposoby jeffektivnoj obrabotki rezaniem: Biblioteka tehnologa. – M.: Mashinostroenie, 2005. – 272 s. 5. Jelektroimpul'snaja obrabotka metallov / A.L. Livshic, A.T. Kravec, I.S. Rogachev, A.B. Sosenko. – M.: Mashinostroenie, 1967. – 294 s. 6. Integrirovannyye generativnyye tehnologii: ucheb. posobie [dlja stud. vys. ucheb. zavedenij] / A.I. Grabchenko, Ju.N. Vnukov, V.L. Dobroskok [i dr.]; pod red. A.I. Grabchenko. – Har'kov: NTU "HPI", 2011. – 416 s. 7. Poduraev V.N. Rezanie trudnoobrabatyvaemykh materialov. – M.: Vyssh. shkola, 1974. – 587 s. 8. Osnovy teorii rezanija materialov: uchebnik [dlja vyssh. uchebn. zavedenij] / Mazur N.P., Vnukov Ju.N., Grabchenko A.I., Dobroskok V.L., Zaloga V.A., Novoselov Ju.K., Jakubov F.Ja.; pod obshh. red. N.P. Mazura i A.I. Grabchenko. – 2-e izd., pererab. i dopoln. – Har'kov: NTU "HPI", 2013. – 534 s. 9. Mashinostroenie. Jenciklopedija: V 40 t. / Mashinostroenie. – M., 2000. – T. III-3: Tehnologija izgotovlenija detalej mashin / A.M. Dal'skij, A.G. Suslov, Ju.F. Nazarov i dr.; Pod obshh. red. A.G. Suslova. – 840 s. 10. Smolencev E.V. Proektirovanie jelektricheskikh i kombinirovannykh metodov obrabotki. – M.: Mashinostroenie, 2005. – 511 s. 11. Perepelica B.A. Avtomatizirovannoe profilirovanie rezhushhih instrumentov (teorija i algoritmy): Uchebnoe posobie. – Har'kov: HPI, 1985. – 107 s. 12. Ermakov Ju.M. Sostojanie i tendencii razvitiya kombinirovannykh sposobov mehanicheskoj obrabotki. – M.: VNIITJeMR, 1985. – 48 s. 13. Granovskij G.I. Kinematika rezanija. – M: Mashgiz, 1948. – 200 s. 14. Rodin P.R. Osnovy proektirovanija rezhushhih instrumentov: Uchebnik. – K.: Vyshha shk., 1990. – 424 s.

O. Katruk, Kyiv, Ukraine

THE ANALYSIS OF DYNAMIC PHENOMENA IN TECHNOLOGICAL SYSTEM AT MILLING CASE DETAILS

This article is intended to analyze the dynamic phenomena origin reasons in the process of milling as oscillatory cutting process and multimass elastically dissipative systems of the machine, reveal the origin conditions of pre-resonant and resonant phenomena in the system, and their mechanism and the energy level of performance and impact on the dynamic stability of the processing system.

Keywords: dynamic and resonant phenomena, milling thin-walled parts, cutting force

The paper investigates the dynamic oscillatory processes origin reasons in processing system, as an example – milling in the process of cutting and resilient, multi-mechanical system of the machine, their functional interdependence conditions, origin conditions of resonant phenomena in this case, their physics, energy level and the impact of such events on the quality of processing.

Objects and methods of research

The object of study in this paper is a manufacturing process of milling the thin-walled parts made of aluminum, and the subject of research is dynamic and resonant phenomena in technological system when milling the thin-walled parts made of aluminum.

Research methods are stability theory of elastic mechanical systems and their oscillations, experimental research of milling process, methods of vibration signal analysis, the scientific basis of such phenomena stabilization capability.

Setting objectives

It is known that the milling process is always accompanied by dynamic phenomena that affect the cutting process, the tool's stability and the quality of the surface to be processed. The main reason for the oscillations of the technological processing system is the unsteadiness of the cutting process [1-5].

The appearance of vibrations in the cutting process and their resonant phenomena in the processing system is a significant barrier for increasing the productive processing of parts on the machine and their quality. This problem is further complicated by the fact that it is difficult to predict, in each case, which of the parameters of the processing and to which side (reduction or increase) are needed to be adjusted to ensure the stability of the processing [6].

It is known that two types of oscillations are observed when tooling: forced and those that are stimulated first. Forced oscillations appear due to the periodicity of the action of the perturbing force of cutting. They can arise as a result of: the intermittent nature of the cutting process; wearout of a cutting tool; unevenness of

the rolling of the workpiece for processing and its displacement during fixing; unbalance of machine components, parts and tools; defects in the mechanisms of the machine [2,3].

The most important thing is the determination of the influence of the dynamics of individual components of the technological processing system on the pre-resonant and resonant phenomena origin conditions, their mechanism and energy level, the effect and the impact on the dynamic stability of the technological processing system (TPS).

The given task can be solved by mathematical modeling of dynamic vibrational processes in the technological processing system during milling.

Results and discussion

The wearout of the tool also causes the error of processing the details because there is inconsistency of its actual size to the calculated size, which was taken when creating a control program for a CNC machine.

If the processing time of one part with the tool is significantly less than the time of its dimensional stability, the effect of the tool wearout can be taken into account by making a correction based on the results of the measurement of the processed parts. On the other hand, the wearout of the tool increases the cutting forces, resulting in the deformation of the TPS, as well as, respectively, the processing errors.

The appearance of inadmissible vibrations in the process of cutting from resonance phenomena is a significant obstacle for the productive milling of the workpiece on the machine tools. This problem is further complicated by the fact that it is difficult to predict in each case which of the parameters of the processing and to which side (reduction or increase) are needed to be adjusted to ensure the stability of the processing. Various methods of reducing the levels of acoustic vibration radiation of noise sources and vibration elimination are used to do this, such as: localizing acoustic vibration radiation propagation ways; injection of additional oscillations using antivibrators; improvement of organizational and preventive measures at work. But promising is the adaptive regulation of the parameters of the elastic system and the cutting modes for suppressing resonances.

When cutting, self-oscillation pathogen is an ambiguous quasi-periodic force of cutting and the presence of elastic deformations of the TPS. And the causes of the instability of the cutting force are the change of rejection Δt , the hardness of the material ΔHB , the frequency of the chip formation T_p , the friction of the tool and the part, as well as the influence of external factors from the engines of the machine tool, etc. In the presence of self-irritation in the system of contact "part-tool", small oscillations are amplified to some constant value with the amplitude, which makes an equilibrium between the energy supporting the oscillations and the energy of the scattering comes into play.

The quality of the process of mechanical processing (PMP) is significantly influenced by dynamic phenomena of different nature and intensity in the form of

oscillatory processes of its elements that arise in an elastic TPS. If during milling on universal metal-cutting machines the pre-resonance phenomenon occurs and the worker can still track and take appropriate measures, then on CNC machines such a phenomenon inevitably leads to an emergency situation and even to a breakdown. Unfortunately, deep analysis in the technical literature in the field of the development of resonant phenomena in mechanical systems is not enough.

Origin conditions of dynamic phenomena

The origin condition of dynamic processes in TPS, as known, is variable in size and quasi-periodic in time dynamic component of cutting force $\Delta P_d(\tau)$, which arises from disturbing characteristics of the cutting process variable in time. Established [1] that the greatest impact on the value $\Delta P_d(\tau)$ in the milling causes a variation of the cut depth $\Delta t(\tau)$, where the main role is played by bias of the blank when it is being established and fixed in the adaptation of the machine and its manufacturing geometric errors. This causes a change in allowance and cutting force, which leads to the dynamics of cutting force $\Delta P_y(\tau)$ acting on the spindle speed per second ω_d .

However, there are some additional disturbing periodic cutting forces such as uneven width and depth of milling, frequency of cutting and exiting of each tooth of cutter, heterogeneity of the material, the frequency of the chip formation T_p , the frequency of the friction forces changes F_{Tp} , like friction-relaxation processes of friction in the contact zone of the tool with the workpiece and so on. Then the total variable force in the direction of the axis Y-Y, which affects the quality of processing the most, can be represented as (1,2,4) taking to account the temporary factors:

$$P_y(\tau) = P_{cp} + \Delta P_{dy}(\tau) \sin \omega_d \tau + \sum_{i=1}^n C_{pi} \cos(\omega_d \tau i + \varphi_i) \quad (1)$$

where P_{cp} – the average value of the cutting force, determined by known dependence;

C_{pi} – force coefficients of variable additional elements of cutting forces of lower orders, in the fractions of the energy level from the main dynamic component of the cutting force in the direction of normal $\Delta P_{dy}(\tau)$, as their reduction in magnitude and number of them is n;

$\omega_d \tau$ – time period of change of the basic periodicity of the change $\Delta P_{dy}(\tau)$;

φ_i – phase shift of the vectors of additional dynamic forces of cutting relative to the Y axis, forming the entire other high-frequency spectrum of the oscillations of the cutting force $P_y(\tau)$;

i – their serial number by decreasing energy influence on the dynamics of cutting.

Such a dynamic mode of operation of the cutting process, depending on the processing time τ and the allowance $\Delta t(\tau)$, will be recorded as:

$$T_p \frac{d^2 P_y(\tau)}{d\tau^2} + P_y(\tau) = -K_p(\tau)Y \quad (2)$$

Y - the value of the elastic relative oscillation of the part and the cutting tool;

$K_p(\tau)$ – coefficient of rigidity of cutting, defined as:

$$K_p(\tau) = \frac{P_y(\tau)}{t(\tau)} \quad (3)$$

In processing, the cutting depth $t(\tau)$ periodically varies ($\pm \Delta t$), which also changes the cutting force, so $K_p(\tau)$ is also a variable; $K_p(\tau)$ - is the time of chip formation, as shown by the study, changes with the change of ω_d and determines higher spectrum of the oscillations frequencies of PMP.

Dynamic vibrational mode $P_y(\tau)$ causes periodic, elastic, relative movements of the part and tool to a value Y, which leads to the appearance of elastic oscillations of the elements of the TPS and the emergence of a secondary dynamic vibrational mode in this elastic-dissipative mechanical system in the form of a self-oscillatory process. It is described by the equation [5]:

$$M \frac{d^2 Y}{d\tau^2} + H \frac{dY}{d\tau} + CY = f_{Tp} P_y(\tau) \quad (4)$$

where M –the weight of the system; H - its dissipative-damping characteristics; C - its rigidity; f_{Tp} - coefficient of friction when cutting metal.

The functional dependence of the TPS dynamics in the form of a dynamic operator W_{YCC} as an elastic system of the machine, on its main indicators (4.5) will look:

$$W_{YCC} = f(M; H; C; P_y(\tau)) \quad (5)$$

From this it follows that the self-oscillatory in the TPS is disturbed and supported by a quasiperiodic change in the force of cutting $P_y(\tau)$ and at the same time largely determined by the dynamic constant characteristics of this system M, H and S.

Investigation of oscillatory dynamic modes of PMP and TPS, and their phase-frequency characteristics (PHC) allowed to draw the following conclusions:

1. PHC of PMO is largely determined by the spindle rotational speed ω_d and in the process of processing can vary in a wide range in the transition from semi-pulp to finishing processes.

2. In the case of machining, the tool wears out and stops, because of this T_p and f_{Tp} changes, and the PHC and PMO are gradually shifted to the low frequency region.

3. PHC TPS is largely determined by the dynamic constant of the elastic-dissipative system, such as M, H and C, which causes its certain inertia to change the PHC of the PMO at work.

Determination of the causes of resonant phenomena

The TPC itself is a multi-element system with its m_i , c_i i h_i , which have their own influence on the system and distort the dynamics of self-oscillations. All these elements of TPS at work depend on their FHC and their own limit of free frequency oscillation:

$$\omega_{oi} = \sqrt{\frac{C_i}{m_i}} \quad (6)$$

When changing the PHC of the machining process, there are always inevitable cases when the dynamic characteristics $\omega_{di}(1)$ of the cutting process can coincide by the frequency and phase with ω_{oi} , as $\omega_{di} \approx \omega_{oi}$, which leads to resonance in the processing system.

Consider the mechanics and physics of the occurrence of such a phenomenon during milling on the example of one of the elements of an elastic TPS. If such an element with mass m is brought out of equilibrium at a distance Y and let go, then it will start elastic oscillations and at the end of each turn there will be two forces acting on it:

- the force of inertia of motion, which is equal to Newton's second law (the second derivative of force for acceleration);
- the elastic force of the system cY .

By the principle of Dalamber at the end of the journey, the sum of the forces acting on such a body is equal to 0:

$$mY'' + cY = 0 \quad (7)$$

Transforming the equation we obtain:

$$Y'' + \frac{c}{m}Y = 0 \quad (8)$$

It is accepted to replace the ratio $\frac{c}{m}$ by the frequency of the subject self-vibration $\omega_0 = \sqrt{\frac{c}{m}}$.

As a result, we obtain the equation

$$Y'' + \omega_0^2 Y = 0 \quad (9)$$

When imposing disturbing quasi-periodic oscillating force $P_y(\tau)$ (1) on such an element, in which the fundamental frequency of oscillation is ω_d , we obtain the equilibrium of forces by D'alamber at any time

$$P_y(\tau)\sin\omega_d\tau - cY - mY'' = 0 \quad (10)$$

or

$$mY'' + cY = P_y(\tau)\sin\omega_d\tau \quad (11)$$

The resulting equality is heterogeneous, since the right part is not zero. It can be solved in individual cases. Consider the case with the condition that the element with mass m is at the beginning of the coordinate movement Y_0 . Then, when disturbing it with frequency $\omega_d\tau$, we obtain the equations of motion of such a body:

$$Y = Y_0 \sin\omega_d\tau \quad (12)$$

Where Y_0 – represents the amplitude of forced oscillations and it is chosen from the condition of satisfaction of the equation (11). Twice differentiating (12) determine the acceleration of such oscillatory motion:

$$Y'' = -Y_0\omega_d^2 \sin\omega_d\tau \quad (13)$$

Substituting (12) and (13) in the expression (11) we obtain:

$$-mY_0\omega_d^2 \sin\omega_d\tau + cY_0 \sin\omega_d\tau = P_y(\tau)\sin\omega_d\tau \quad (14)$$

After the cuts and transformations in the end we have:

$$cY_0 - mY_0\omega_d^2 = P_y(\tau) \quad (15)$$

This allows us to find the amplitude Y_0 of such forced oscillations of elements of the elastic system of the TPC:

$$Y_0 = \frac{P_y(\tau)}{c - m\omega_d^2} \quad (16)$$

Replacing c and m through $\omega_0 = \sqrt{\frac{c}{m}}$, we find

$$Y_0 = \frac{P_y(\tau)}{c(1 - \frac{\omega_d^2}{\omega_0^2})} \quad (17)$$

From the obtained result it turns out that in such oscillations with disturbing frequency ω_d , their amplitude Y_0 , when approaching ω_d to the frequency of internal oscillations ω_0 of the elastic system element, begins to increase rapidly and to be drawn into the resonance phenomenon. When there is a special case $\omega_{di} \approx \omega_{oi}$, then $Y \rightarrow \infty$. However, due to the presence of dissipative factors in the system, the amplitude of such oscillations has a certain limit. But the energy level of such oscillations is very high and leads to loss of dynamic stability of PMP and TPS.

We investigate such an energy level of the resonance. The kinetic energy of motion of such oscillations of an element with mass m is determined by the expression:

$$W_k = \frac{mv^2}{2} = \frac{m}{2} \left(\frac{dY_i}{d\tau} \right)^2 \quad (18)$$

Analysis (17) and (18) shows that with constant c - elasticity, m - body mass and frequency ω_d amplitude of oscillations Y_i grows rapidly. Consequently, in order to satisfy equality, it grows with the same speed and speed of displacement v , with the quadratic dependence and the kinetic energy of such a resonance phenomenon can grow to large values, which can lead to loss of quality of PMP and the reliability of the TPC.

Conclusions

When milling, there always are variable characteristics that disturb elastic TPS and force of cutting, as a number of triggers of dynamic oscillation processes. In addition to the main dynamic vector $P_d(\tau)$ acting with frequency ω_d , in $P_y(\tau)$ there are triggers of the dynamics of the cutting forces of small orders (1), which have a whole spectrum of system disturbing frequencies ω_{di} of higher order. In

addition, the processing system itself is multivariate, multi-elemental and elastic with its own m_i , that have different frequencies of its own oscillations ω_{0i} . When cutting tool is blunt, the entire frequency range of the cutting force $P_y(\tau)$ is shifted to the low frequency region.

All of these factors represent a high probability of occurrence of resonant phenomena in machining with coincidence of ω_{di} and ω_{0i} .

So the development and implementation of automatic control systems represents an actual problem of improving the quality of processing.

References: 1. Poduraev V.N., Barzov A.A. Technological diagnostics of cutting by the method of acoustic emission. M. Machine-building 1988. p.56. 2. Popov V.I., Loktev V.I. Dynamics of machine tools. K.: Technics, 1975. – 183 pp. 3. Gnateyko N.V. Investigation of the vibrational process of the machine during machining. / Perspective technologies, equipment and preparation of production. – K.: NTUU "KPI", 1997. – pp. 61-63. 4. Gnateyko N.V., Rumbesta V.A. Analysis of the dynamic stability of the processing system. / Vibration in technology and technologies, 1999. – №12. – pp. 28-10. 5. Gnateyko N.V., Rumbesta V.O. Method of control of the dynamics of the machining system. / Scientific reports of NTUU "KPI", 2002, No. 6. – pp. 55-58. 6. Melnichuk P.P. Dynamic process of end milling with wearing of cutting elements / Bulletin of the ZTU / Technical Sciences. – 2012. – No. 2 (61). pp. 33-40.

УДК 378.147

Н.В. Козакова, канд. техн. наук, Г.К. Крижний, канд. техн. наук,
С.В. Островерх, канд. техн. наук, Харків, Україна

ПІДГОТОВКА ФАХІВЦІВ СПЕЦІАЛІЗАЦІЇ «СТАНДАРТИЗАЦІЯ, СЕРТИФІКАЦІЯ ТА УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ ПРОДУКЦІЇ» В НТУ «ХП»

У статті представлено особливості підготовки конкурентоспроможних фахівців за спеціалізацією «Стандартизація, сертифікація та управління якістю продукції» у зв'язку зі змінами у переліку галузей знань і спеціальностей і розвитком інноваційно-технологічних кластерів у Харківському регіоні.

Ключові слова: якість промислової продукції, конкурентоспроможність, висококваліфіковані фахівці, стандартизація, сертифікація

В статье представлены особенности подготовки конкурентоспособных специалистов по специализации «Стандартизация, сертификация и управление качеством продукции» в связи с изменением перечня областей знаний и специальностей и развития инновационно-технологических кластеров в Харьковском регионе.

Ключевые слова: качество промышленной продукции, конкурентоспособность, высококвалифицированные специалисты, стандартизация, сертификация

The paper presents the features of competitive specialists specialization «Standardization, certification and management by quality of production» in connection with changes in scroll of the fields of knowledge and specialization and the development of innovation-technological clusters in the Kharkov region.

Keywords: quality of industrial products, competitiveness, highly qualified specialists, standardization, certification

Головним завданням вищої школи є підготовка для господарства країни фахівців, спроможних кваліфіковано орієнтуватися у питаннях сучасного виробництва, використовуючи сучасні технології, досягнення науки, техніки та вимоги стандартів, що гарантуватиме високу якість вітчизняної продукції. Тому підготовка фахівців зі стандартизації, сертифікації та якості продукції, які б забезпечили стійке керування якістю, є досить актуальним завданням.

Проблеми підвищення якості усіх видів продукції є сьогодні пріоритетними у світовому співтоваристві. Для цивілізованих країн вимогливе ставлення до якості стало формою мислення, і деякою мірою рівень якості є показником рівня життя і культури нації.

Продовжує зростати значення якості і як важливого фактора на ринку збуту. Продукція, яка не має сертифіката, що підтверджує відповідність вимогам стандартів, не може бути реалізована на світовому ринку. Ця обставина широко використовується як засіб конкурентної боротьби у

міжнародній торгівлі. Продукція, що не витримала сертифікаційних іспитів, може бути реалізована тільки за цінами у кілька, а іноді й у десятки разів нижчими у порівнянні з аналогічною, що одержала сертифікат. У багатьох випадках така продукція просто не знаходить споживача.

Тому, хоча проведення в життя програм якості вимагає значних витрат, якості продукції у всіх країнах світу приділяється велика увага, тому що ці витрати набагато менші, ніж витрати, пов'язані з низькою якістю.

Україна остаточно обрала шлях до євроінтеграції, як головну стратегію розвитку, тому поліпшення якості і конкурентоспроможності продукції, створення умов для повного розкриття потенціалу підприємств, досягнення ділової досконалості, всебічна підтримка та сприяння розвитку сфери управління якістю набувають особливого значення.

Для прискореного розвитку підприємств і проникнення на зовнішні ринки продукція, що випускається, повинна відповідати світовим вимогам, встановленим відповідними положеннями міжнародних стандартів. Особливо актуальним це стає з моменту підписання Україною Договору про асоціацію з Європейським союзом (ЄС). Для того, щоб стати повноцінним членом ЄС сьогодні потрібно переорієнтувати вітчизняну економіку на створення товарів, очікуваних на європейському ринку. Це вимагає не тільки підвищення якості продукції й послуг, які вже є об'єктами виробництва, до рівня вимог міжнародних стандартів, а й початку випуску нових товарів європейської якості, що мають достатній попит на Заході.

У зв'язку з цим Міністерством освіти і науки було внесено зміни у навчальні плани підготовки фахівців неекономічних спеціальностей з метою вивчення таких дисциплін, як менеджмент і маркетинг. Однак чисто економічне спрямування таких курсів без зв'язку з конкретним виробництвом не створювало необхідного уявлення про заходи забезпечення конкурентоспроможності. Кваліфіковані з питань якості фахівці – це ті, що володіють навичками досліджень, здатних створювати на підприємствах відповідну систему якості на базі досконалого вивчення виробничих можливостей, глибоких знань у галузі стандартизації і сертифікації.

У харківському й інших регіонах України склалося не зовсім задовільне положення із забезпеченням підприємств саме такими кадрами, здатними швидко реагувати на зміну вимог ринку до номенклатури і якості промислової продукції. У відповідь на ці потреби НТУ «ХПІ» впродовж десяти років готує фахівців з якості, стандартизації та сертифікації, основним завданням яких є професійне управління питаннями якості, безпеки, стандартизації та сертифікації продукції.

На сьогодні більшість вищих навчальних закладів (ВНЗ) України готують таких фахівців. І хоча НТУ «ХПІ» – один з технічних ВНЗ у Харкові із заявленої освітньої послуги, спочатку специфікою підготовки у ньому за даною спеціальністю була відсутність жорсткої прив'язки до будь-якого фаху саме так, як міжнародна система якості ISO 9000 дає загальні і широкі

рекомендації із забезпечення якості. Коли ж найближчим часом може знадобитися переорієнтування промислових підприємств міста Харкова на випуск продукції для європейського ринку, саме такі магістри з якості, стандартизації та сертифікації зможуть якнайкраще включитися в цю роботу.

Головними завданнями у підготовці цих фахівців є опанування систем технічного регулювання і споживчої політики, сумісними з аналогічними системами розвинутих країн, використання стандартів, технічних регламентів, процедур оцінки відповідності і ринкового нагляду, які б сприяли міжнародному обміну товарами і послугами, підвищенню якості і конкурентоспроможності на усіх рівнях виробництва та торгівлі заради кінцевої мети – задоволення споживачів і надійного захисту життя, здоров'я, створення безпечних умов праці й охорони навколишнього середовища на користь населення всіх країн світу. Навчальний процес за спеціальністю 8.18010010 «Якість, стандартизація та сертифікація» враховував також поглиблене вивчення європейських стандартів і засобів адаптації України до роботи за цими стандартам. Особлива увага приділялась вивченню особливостей процедур сертифікації у різних європейських країнах і засобам вирішення задачі визнання українських сертифікатів.

У зв'язку із затвердженням переліку галузей знань і спеціальностей, за якими здійснюється підготовка здобувачів вищої освіти, наказом МОН України № 266 від 29.04.2015 р. спеціальність «Якість, стандартизація та сертифікація» в НТУ «ХПІ» увійшла як спеціалізація 131-07 «Стандартизація, сертифікація та управління якістю продукції» до спеціальності «Прикладна механіка» галузі знань «Механічна інженерія». Це надало поштовх наблизити підготовку фахівців спеціалізації до проблем якості машинобудівного виробництва, фахівців для галузей якого готує спеціальність «Прикладна механіка». Це цілком відповідає також і сучасним потребам розвитку харківського регіону, як одного з найбільш високорозвинених в Україні у промисловому і науково-технічному значенні. Оскільки машинобудування створює технічну базу всіх галузей виробництва, якість його продукції в значній мірі визначає ефективність всього господарства країни. Здійснювані наразі структурні зміни та модернізація більшості харківських промислових підприємств не можливі без фахівців з управління якістю, які поряд з класичною інженерною підготовкою у достатній мірі володіють знаннями та вміннями для вирішення теоретичних і практичних питань, пов'язаних з цілеспрямованим поліпшенням якості та конкурентоспроможності продукції.

Розроблена освітня програма підготовки магістрів у частині спеціалізації «Стандартизація, сертифікація та управління якістю продукції» врахувала усі необхідні зміни: це вивчення основ науково-технічної підготовки сучасного гнучкого виробництва, методів і способів рішення актуальних проблем на базі системно-структурного підходу, сучасних інформаційних систем і способів реалізації наукових досліджень. Такі фахівці повинні вміти розкрити

і повною мірою використати можливості устаткування, знати метрологію, сучасні технології, методи адаптації до вимог конкурентної боротьби в ринкових умовах.

За два роки навчання магістр опановує:

- методи стандартизації;
- положення про розробку нормативних документів різного рівня;
- знання про сучасні показники оцінювання якості;
- міжнародні стандарти з якості;
- питання систем контролю і сертифікаційних заходів;
- стратегічні задачі систем управління якістю, їхньої сертифікації і аудиту;
- засоби і методи метрологічного забезпечення якості;
- методи адаптації до конкурентної боротьби у ринкових умовах;
- принципи наукових досліджень і застосування у них комп'ютерних технологій і методів математичного моделювання;
- правила соціальної та екологічної безпеки діяльності;
- правові і соціальні аспекти проблеми якості;
- основні питання маркетингових досліджень, менеджменту, психології та інтелектуальної власності.

У поєднанні з конструкторсько-технологічною підготовкою на базі бакалаврату це створює ідеальну модель фахівця із стандартизації, сертифікації та управління якістю продукції для промислових підприємств не тільки Харкова, а й усього південно-східного регіону України.

Однак, поточний стан економічного середовища в країні свідчить про необхідність спрямування значних зусиль на розвиток і регулювання малого і середнього бізнесу, це стосується не тільки законодавчої і технічної допомоги, але й кадрової підтримки фахівцями з якості, які б підвищили економічну результативність цього сегмента підприємництва і забезпечили присутність його продукції на міжнародному ринку. Тому не зважаючи на досить «молоду» за часом існування спеціалізацію (спеціальність), її випускники усіх років не перебувають на обліку у харківському регіональному центрі зайнятості і користуються попитом як на місцевому ринку праці, так і за його межами, про що свідчить їх 100 % працевлаштування на підприємствах і установах різного рівня і форм власності.

Саме спільний і паралельний розвиток потенціалу різних підприємств України може створити вагомий внесок у створення інноваційного потенціалу харківського регіону і наблизити країну в цілому до інтеграції у євроспоживарський простір.

Високий науково-технологічний потенціал Харківської області зробив її лідером кластеризації у сфері високих технологій, і Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» є одним з ініціаторів створення таких кластерів. НТУ «ХПІ» та Індустріальною групою УПЕК,

однією з найбільших машинобудівних компаній України, створено кластер – навчально-науково-виробничий комплекс (ННВК) «Техноград», націлений на розв’язання проблем механіки, машинознавства, енергетики і машинобудування. Першим проектом у серії науково-освітніх програм у рамках ННВК «Техноград» було створення унікального спеціалізованого навчально-дослідного класу-кластеру «Політехнік-125». На його порядку денному поряд із розробкою комп’ютерних суперсистем для оперування складними моделями є також підготовка відповідних науково-освітніх та інженерних кадрів за індивідуальними навчальними програмами. Магістри з стандартизації, сертифікації та управління якістю продукції також знаходять своє місце у його стратегічному напрямі інтеграції сучасних комп’ютерних технологій та наукових розробок як фахівці з стандартизації та сертифікації створюваних спеціалізованих систем, баз знань і комплексів моделей. Знаючи потреби і проблеми сучасних підприємств, вони також безпосередньо сприятимуть впровадженню актуальних проектних розробок у виробництво і просуванню перспективних наукових досліджень на ринок України. На вирішення подібних задач можуть бути націлені магістри за спеціалізацією «Стандартизація, сертифікація та управління якістю продукції» і у рамках регіонального аерокосмічного кластера «Мехатроніка», створеного спільно з НТУ «ХП», ХНУРЕ, НАУ ім. М. Є. Жуковського «ХАІ» та ХНУ ім. В. Н. Каразіна. Його учасниками є також такі провідні підприємства країни як ПАТ «ФЕД», ДП «АНТОНОВ», АТ «МОТОР СІЧ», ДП «Запорізьке машинобудівне конструкторське бюро «Прогрес» ім. академіка О. Г. Івченка», які спільно з ВНЗ покликані удосконалювати підготовку висококваліфікованих кадрів, у тому числі з стандартизації, сертифікації та якості для аерокосмічної галузі, виконувати наукові дослідження і розробки для вирішення проблем підприємств цієї галузі.

Розвиток інноваційно-технологічних кластерів в Харківському регіоні, а також реформування вищої освіти в Україні вимагає від випускової для фахівців спеціалізації «Стандартизація, сертифікація та управління якістю продукції» кафедри «Інтегровані технології машинобудування» ім. М. Ф. Семка постійного осучаснення навчальних програм і планів відповідно до вимог вітчизняних і міжнародних стандартів, досягнень науки, техніки і технології, нагальних потреб виробництва, бізнесу і суспільства в цілому.

Одним з перспективних напрямів навчання таких фахівців колектив випускової кафедри вважає посилення метрологічної складової їхньої підготовки. Якнайкраще це завдання виконає науковий Учбово-виробничий центр з 3D систем, який відкрито в НТУ «ХП» на кафедрі «Інтегрованих технологій машинобудування» ім. М. Ф. Семка і доступ до якого вже з весняного семеста будуть мати студенти. Його обладнання дозволяє виконувати замкнений цикл виробництва: від створення 3D моделей до сертифікації вимірювань у різних галузях машинобудування. В учбово-

виробничій лабораторії «Високі технології машинобудування» кафедри 3D принтери створюють точну копію виробів як з м'яких матеріалів, так і з скла, пластика, гіпсу, деревини, здійснюється процес їх вимірювання і якісного аналізу. Учбово-виставковий центр метрології у машинобудуванні «SINERGIA», що також входить до складу центру, має у своєму розпорядженні обладнання для 3D сканування і зворотнього моделювання, сучасні засоби індустріального метрологічного контролю. Серед обладнання потрібно виділити: безконтактну машину «лазерний трекер», орієнтовану на важке машинобудування, авіабудування та енергетичний комплекс, що вимірює великогабаритні вироби (розміром до 320 метрів) з мікронною точністю і здійснює їх розмірний контроль; «вимірювальну руку», що здійснює як точковий розмірний контроль, так і зворотній інжиніринг методом лазерного сканування; оптичний сканер, орієнтований у тому числі на автомобілебудування і медицину (пластична хірургія, створення протезів) та ін. Новітнє обладнання дозволяє вирішувати проблеми сучасної промисловості з якості продукції, скорочуючи строки підготовки до її випуску у 2–4 рази, зменшуючи її собівартість у 2–3 рази і суттєво підвищуючи конкурентоспроможність виробництва. Співзасновник центру метрології «SINERGIA» і Генеральний директор однієї з провідних фірм на ринку засобів вимірювальної техніки України Олег Семко вважає, що на сьогодні в країні подібних лабораторій немає, і якщо не насичувати ВНЗ сучасною технікою, то не буде місць для підготовки висококваліфікованих фахівців.

Маючи під час навчання доступ до інноваційного обладнання фахівці спеціалізації «Стандартизація, сертифікація та управління якістю продукції» зможуть здобути навички якісних високоточних вимірювань, зможуть пропонувати проектування, створення і збут затребуваних сучасних виробів, практично вирішуючи питання з якості продукції у своїх курсових проектах та дипломних роботах. Це якнайкраще посилює практичну підготовку таких фахівців і співпадає з світовими тенденціями сучасної освіти – виділення до 50 % навчального часу на практику. За словами голови наглядової ради НТУ «ХПІ» Василя Хмельницького випускник університету повинен мати практичні навички, що дозволять йому працевлаштуватися в Україні, створювати якісну конкурентоспроможну продукцію, і як результат – виграють усі, а головним чином економіка країни.

Відкриття завдяки співробітництву НТУ «ХПІ» з бізнесом такого сучасного центру для якісного практичного навчання студентів, разом з високою теоретичною підготовкою студентів кваліфікованим викладацьким складом університета дають можливості для реалізації неймовірних починань, дозволяючи майбутнім випускникам, насамперед за спеціалізацією «Стандартизація, сертифікація та управління якістю продукції» бачити на практиці втілення своїх ідей.

УДК 621.9.06

Ю.М. Кузнецов, д-р техн. наук, Б.І. Придальний, канд. техн. наук,
Ю.В. Гайдаєнко, канд. техн. наук, Київ, Україна

ЗАТИСКНИЙ ПАТРОН ІЗ ЗОВНІШНІМ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИМ ПРИВОДОМ

Здійснено генетичний структурно-схемний синтез автоматичного затискного механізму для циліндричних об'єктів за цільовою функцією пошуку, що складається з сукупності вимог та обмежень. Представлена генетична модель синтезованої структури, поданий аналіз структуроутворення і варіант схеми пристрою відповідно до заданої цільової функції. Запропоновано будувати конструкцію на модульному принципі з використанням універсального електропривода.

Ключові слова: затискний патрон, затискний механізм, генетичний синтез, електромагнітна хромосома, структурна формула, електропривод

Осуществлен генетический структурно-схемный синтез автоматического зажимного механизма для цилиндрических объектов по целевой функцией поиска, состоящей из совокупности требований и ограничений. Представлена генетическая модель синтезированной структуры, дан анализ структурообразования и вариант схемы устройства в соответствии с заданной целевой функцией. Предложено строить конструкцию на модульном принципе с использованием универсального электропривода.

Ключевые слова: зажимной патрон, зажимной механизм, генетический синтез, электромагнитная хромосома, структурная формула, электропривод

In article is given genetic structural and schematic synthesis of an automatic clamping mechanism for cylindrical objects according to the target search function which consisting of a set of requirements and restrictions. Is presented genetic model of the synthesized structure and analysis of formation of structure and the variant of the device scheme in accordance with the target function is given. It is proposed to build a construction on a modular principle using a universal electric drive

Keywords: clamping chuck, clamping mechanism, genetic synthesis, electromagnetic chromosome, structural formula, electric drive

Вступ. Розвиток конструкцій затискних механізмів (ЗМ) при незмінності їх загальної структури може відбуватися шляхом розширення і удосконалення складу елементної бази [1, 2]. Одні і ті ж функціональні елементи можуть бути виконані на основі різних перетворювачів енергії: механічних, електричних, гідромеханічних, електромеханічних, їх комбінації, тощо [3,4]. Тобто, нові конструктивні рішення ЗМ можна одержувати, комбінуючи його складовими елементами. Ці елементи можна розглядати, як окремі модулі, що встановлюються в ЗМ відповідно до необхідності забезпечення певних характеристик.

Очевидно, що розширення або підвищення рівня універсальності модулів ЗМ, дозволяє зменшити витрати на їх виготовлення, логістику і обслуговування при збереженні якості виробу, а також розширює можливості інших виробників для виготовлення аналогів. Підвищення універсальності модулів технічних систем до «міжвидового» рівня дозволяє використовувати

такі модулі в технічних системах різних видів (різного призначення), що сприяє зменшенню загальної номенклатури елементів технічних систем.

Для підвищення ефективності застосування універсальних модулів доцільно передбачити «відкритість архітектури» ЗМ, що також сприяє підвищенню ефективності ремонту і дає більші можливості користувачам розробляти додаткові модулі (пристрої). При цьому у конструкціях існуючих ЗМ не передбачено можливості встановлення універсальних модулів окрім стандартизованих затискних патронів.

Мета роботи – спрямований синтез конкурентоспроможного варіанта ЗМ на модульному принципі, що в основі містить затискний патрон для циліндричних заготовок та хвостового інструмента, з використанням результатів аналізу його генетичної програми [5].

Основний зміст. Виходячи з поставленої мети визначимо цільову функцію пошуку F_{TP} . Цільова функція пошуку визначається з урахуванням відповідної сукупності вимог та певних обмежень. Основні вимоги, що висуваються до шуканої структури S_{TP} , наступні:

- 1) простота та «відкритість архітектури» даної конструкції (C_S);
- 2) модульний принцип будови (Mod);
- 3) використання універсального електропривода (U_{ED});
- 4) циліндрична активна поверхня статора і ротора ($CL_{1,2}$);
- 5) забезпечення можливості провертання обійми затискного патрона

автоматизовано від універсального електропривода (ω_{AU});

З урахуванням вимог, інтегральна функція пошуку в багатовимірному пошуковому просторі R^n має вигляду інтегрального вектора:

$$F_{TP} = [C_S; Mod; U_{ED}; CL_{1,2}; \omega_{AU}] \in R^n \quad (1)$$

Особливість методології генетичного синтезу полягає в тому, що пошукові процедури здійснюються на рівні елементарних електромагнітних структур (електромагнітних хромосом), що суттєво спрощує процедуру пошуку і гарантує повноту їх генетично допустимих варіантів [2]. Аналіз цільової функції F_{TP} показує, що шукана структура належить до класу складних суміщених електромеханічних систем. Однак, на рівні електромагнітних хромосом пошук генетично допустимих варіантів структур можна обмежити лише аналізом хромосомного набору в межах базових Видів ЦЛ 0.2у та ЦЛ 2.0х. Вимога Mod вимагає необхідність розгляду готових модулів, що разом з вимогами U_{ED} та C_S дозволяє у якості одного з найбільш простих варіантів електропривода розглянути можливість використання електростартера автомобільних двигунів, що вже містить систему введення в зачеплення зубчатої передачі. Заданий F_{TP} ставиться у відповідність наступна генетична модель (рис. 1), що відтворює траєкторію пошуку суміщеної електромеханічної структури, яка задовольняє вимогам F_{TP} . Критерієм завершення процедури синтезу виступає ваговий коефіцієнт відповідності k_e , значення якого визначається відношенням інтегральної генетичної схильності P_C відповідної хромосоми до реалізації заданої інтегральної функції F_{TP} .

$$k_g = P_C / F_{TP} \leq 1 \quad (2)$$

Рівень генетичної складності суміщеної електромагнітної хромосоми, яка задовольняє заданій сукупності вимог, визначаємо за результатами генетичного аналізу (табл.).

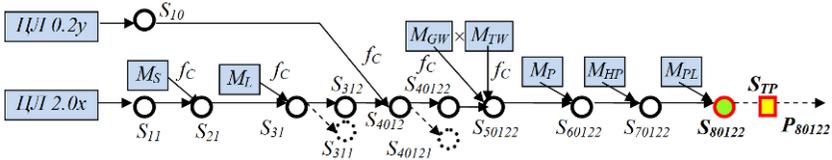


Рисунок 1 – Генетична модель синтезу структури ЗМ за заданою функцією цілі F_{TP} : f_c – оператор генетичного схрещування; $S_{10}, S_{20}, \dots, S_{80122}$ – синтезовані структури хромосом; S_{TR} – технічне рішення; P_{80122} – популяція технічних рішень

Таблиця – Результати генетичного аналізу моделі структуроутворення ЗМ

Електромагнітна хромосома	Структурна формула хромосоми	Статус хромосоми	k_g
ЦЛ/0.2y	ЦЛ/0.2y	Батьківська	-
S_{10}	$(ЦЛ/0.2y)_1:(ЦЛ/0.2y)_2$	Електромагнітна пара	-
ЦЛ/2.0x	ЦЛ/2.0x	Батьківська	-
S_{11}	$(ЦЛ/2.0x)_1:(ЦЛ/2.0x)_2$	Електромагнітна пара	-
S_{21}	$(ЦЛ/2.0x)_1:(ЦЛ/2.0x)_2 \times M_S$	Інформаційна	-
S_{31}	$(ЦЛ/2.0x)_1:(ЦЛ/2.0x)_2 \times M_S \times M_L$	Інформаційна	-
S_{311}	$(ЦЛ/2.0x)_1:(ЦЛ/2.0x)_2 \times M_S \times M_{L(\beta:OY,OZ)}$	Ізомер, інформаційна ($\beta \neq 90^\circ$)	-
S_{312}	$(ЦЛ/2.0x)_1:(ЦЛ/2.0x)_2 \times M_S \times M_{L(\beta:OX)}$	Ізомер, породжувальна ($\beta = 90^\circ$)	0,2
S_{4012}	$[(ЦЛ/0.2y)_1:(ЦЛ/0.2y)_2]:[(ЦЛ/2.0x)_1:(ЦЛ/2.0x)_2] \times M_S \times M_{L(\beta:OX)}$	Інформаційна	-
S_{40121}	$[(ЦЛ/0.2y)_1:(ЦЛ/0.2y)_2]:[(ЦЛ/2.0x)_1:(ЦЛ/2.0x)_2]_{OX,OY} \times M_S \times M_{L(\beta:OX)}$	Ізомер, інформаційна	-
S_{40122}	$[(ЦЛ/0.2y)_1:(ЦЛ/0.2y)_2]:[(ЦЛ/2.0x)_1:(ЦЛ/2.0x)_2]_{OZ} \times M_S \times M_{L(\beta:OX)}$	Ізомер, породжувальна	0,3
S_{50122}	$[(ЦЛ/0.2y)_1:(ЦЛ/0.2y)_2]:[(ЦЛ/2.0x)_1:(ЦЛ/2.0x)_2]_{OZ} \times M_S \times M_{L(\beta:OX)} \times [M_{GW} \times M_{TW}]$	Породжувальна	0,4
S_{60122}	$[(ЦЛ/0.2y)_1:(ЦЛ/0.2y)_2]:[(ЦЛ/2.0x)_1:(ЦЛ/2.0x)_2]_{OZ} \times M_S \times M_{L(\beta:OX)} \times [M_{GW} \times M_{TW}] \times M_P$	Породжувальна	0,5
S_{70122}	$[(ЦЛ/0.2y)_1:(ЦЛ/0.2y)_2]:[(ЦЛ/2.0x)_1:(ЦЛ/2.0x)_2]_{OZ} \times M_S \times M_{L(\beta:OX)} \times [M_{GW} \times M_{TW}] \times M_P \times M_{HP}$	Породжувальна	0,7
S_{80122}	$[(ЦЛ/0.2y)_1:(ЦЛ/0.2y)_2]:[(ЦЛ/2.0x)_1:(ЦЛ/2.0x)_2]_{OZ} \times M_S \times M_{L(\beta:OX)} \times [M_{GW} \times M_{TW}] \times M_P \times M_{HP} \times M_{PI}$	Породжувальна	1,0

Отже, заданій цільовій функції пошуку задовольняє генетично модифікована парна хромосома S_{80122} . Рівень її генетичної складності, а також відповідної популяції технічних рішень P_{80122} , визначається наступною структурною формулою:

$$\begin{aligned} &[(ЦЛ0.2y)_1:(ЦЛ0.2y)_2]:[(ЦЛ2.0x)_1:(ЦЛ2.0x)_2]oz \times M_S \times M_{L\beta OX}] \\ &\times [M_{GW} \times M_{TW}] \times M_P \times M_{HP} \times M_{Pl}, \end{aligned} \quad (3)$$

де: $(ЦЛ0.2y)_1$ – генетичний код первинного джерела електромагнітного поля двигуна обертового руху;

$(ЦЛ0.2y)_2$ – генетичний код вторинного джерела електромагнітного поля двигуна обертового руху;

$(ЦЛ0.2y)_1:(ЦЛ0.2y)_2$ – парна електромагнітна хромосома двигуна обертового руху;

$(ЦЛ2.0x)_1$ – генетичний код первинного джерела електромагнітного поля електромагнітного реле;

$(ЦЛ2.0x)_2$ – генетичний код вторинного джерела електромагнітного поля електромагнітного реле;

$(ЦЛ2.0x)_1:(ЦЛ2.0x)_2$ – парна електромагнітна хромосома електромагнітного реле;

M_S – механічна хромосома пружини (spring);

M_L – механічна хромосома важеля (lever);

M_{GW} – механічна хромосома шестерні (gear wheel);

M_{TW} – механічна хромосома зубчатого колеса (tooth wheel);

M_P – механічна хромосома плунжерів (plunger);

M_{HP} – механічна хромосома рідкого середовища (гідропластмаса) (hydro-plastic);

M_{Pl} – механічна хромосома втулки (plug).

Варіант технічної реалізації синтезованої структури S_{80122} має представлено на рис. 2. ЗМ працює наступним чином. Для затиску інструмента або заготовки з циліндричним хвостовиком (на рис. 2 не показано) включається електромагнітне реле 21, сердечник 20 втягується на величину H_1 , а через важіль 22 шестерня 24 переміщається на величину H_2 і входить в зачеплення із зубчатим колесом 2. За рахунок з'єднання торця сердечника 20 з контактними болтами 19 електричний струм через штоки 17 подається на колекторні пластини 16, ротор 12 повертається і передає через зубчате зачеплення 24, 2 крутний момент M_{a1} на поворотну обойму колеса 2 з положення, зображеного на рис. 2, в ту чи іншу сторону (за годинниковою стрілкою або проти) і за рахунок кута підйому α плунжери 4 занурюються в напрямку осі патрона, створюючи тиск, який викликає радіальну силу затиску

F_{r1} (рис.2, переріз А-А), що стискає плинне середовище 5, наприклад, гідропластмасу. В результаті відбувається радіальна пружна деформація оболонки 7 тонкостінної циліндричної втулки 6, яка стискає циліндричний хвостовик, наприклад, різального інструменту типу фрези з радіальною силою F_{r2} , тобто створюється силовий потік від входу до виходу $M_{a1} - F_{r1} - F_{r2}$. Розтиск виконується при зміні полюсів електричного струму на колекторні пластини 16 (ротор 12 повертається в протилежну сторону) згідно заданої програми в системі ЧПК верстата, а відключення електромеханічного приводу здійснюється при знятті струму в електромагнітному реле 21.

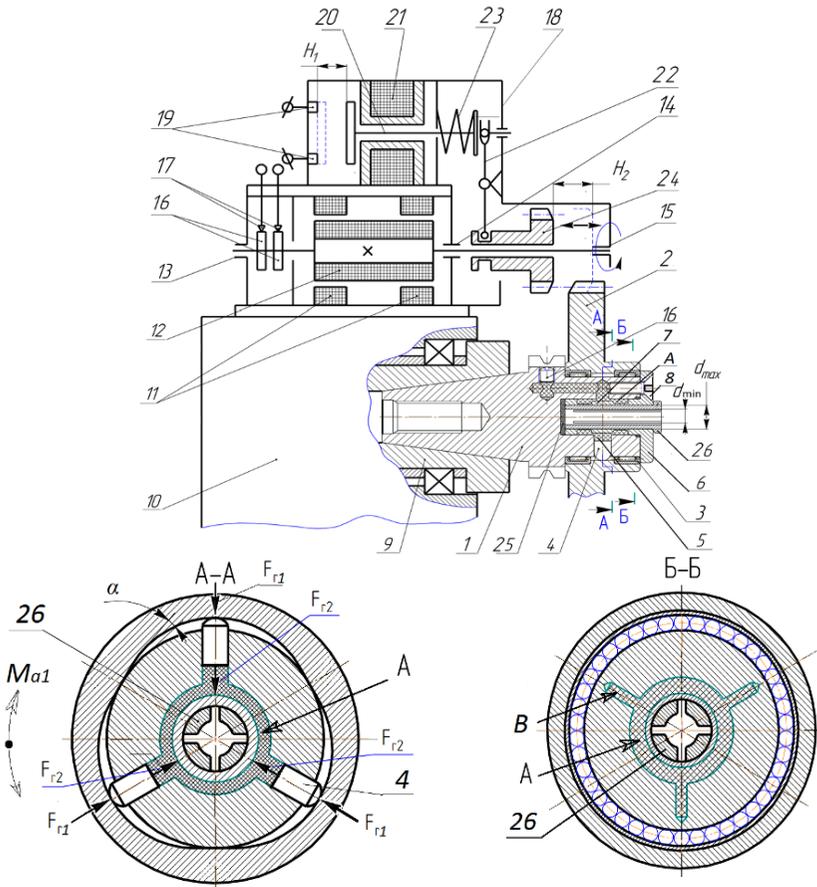


Рисунок 2 – Синтезований ЗМ з електромеханічним приводом

У запропонованій схемі ЗМ перетворення силового потоку відбувається в трьох різних середовищах: **EMF (electromagnetic field)** – електромагнітні поля, що діють безпосередньо або в складі електромеханічних систем передачі і перетворення; **MSB (mechanical solid body)** – механічні передачі і перетворювачі за допомогою твердих тіл; **LFM (liquid flowing medium)** – рідинно-плинні та в'язкі середовища для передачі та перетворення (зміни параметрів силового потоку).

На об'єктному рівні структура такого ЗМ може бути записана наступним чином:

$$EMF(EP - EME - M_{a1}) \times MSB(M_{a1} - GR - M_{a2} - (SP - F_{r1}) \times k) \times LFM(F_{r1} - PL - F_{r2})$$

де $k=3$ – кількість однакових перетворюючих елементів.

Простота та «відкритість архітектури» даної конструкції сприяє спрощенню виготовлення, обслуговування та ремонту ЗМ.

Висновки

У роботі здійснено спрямований синтез конкурентоспроможного варіанта ЗМ на модульному принципі. Відповідно до визначеної цільової функції пошук структури здійснювався на рівні елементарних електромагнітних структур, а також на рівні складних суміщених електромеханічних структур. Запропоновано модульну конструкцію автоматичного ЗМ для затиску циліндричних заготовок та хвостового інструмента з використанням універсального електропривода.

Список використаних джерел: 1. Кузнецов Ю.Н., Волошин В.Н. і ін. Зажимные механизмы для высокопроизводительной и высокоточной обработки резанием: Монография / Под ред. Ю.Н.Кузнецова. – Габрово: Университетское издательство «Васил априлов», 2010.-724 с. 2. Кузнецов Ю.Н., Драчев О.И., Волошин В.Н. Принципы создания станочно-инструментальной оснастки для высокоэффективной токарной обработки: Монография / Под ред. Ю.Н.Кузнецова, – Старый Оскол: ТНТ. 2016.-336 с. 3. Кузнецов Ю.Н., Хамуйела Ж.А.Герра, Хамуйела Т.О. Морфологический синтез станков и их механизмов: Монография / Под ред. Ю.Н.Кузнецова, – К.: ООО «ГНОЗИС», 2012. – 416 с. 4. Кузнецов Ю.М., Придальний Б.І. Приводи затискных механизмов металлообработных верстатов: Монография / За заг. ред. Ю.М.Кузнецова. – Луцьк: Вежа-Друк, 2016. – 352 с. 5. Шинкаренко В.Ф., Кузнецов Ю.Н. Междисциплинарный подход к моделированию и созданию сложных электромеханических систем на примере мотор-шпинделей //Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні технології промислового комплексу».– Херсон: ХНТУ, 2015.– с.8-13.

Bibliography (transliterated): 1. Kuznecov Ju.N., Voloshin V.N. i in. Zazhimnye mehanizmy dlja vysokoproizvoditel'noj i vysokotočnoj obrabotki rezaniem: Monografija / Pod red. Ju.N.Kuznecova.- Gabrovo: Universitetskoe izdatel'stvo «Vasil aprilov», 2010.-724 s. 2. Kuznecov Ju.N., Drachev O.I., Voloshin V.N. Principy sozdanija stanочно-instrumental'noj osnastki dlja vysokoeffektivnoj tokarnoj obrabotki: Monografija / Pod red. Ju.N.Kuznecova,-Staryj Oskol: TNT. 2016.-336 s. 3. Kuznecov Ju.N., Hamujela Zh.A.Gerra, Hamujela T.O. Morfologicheskij sintez stankov i ih mehanizmov: Monografija / Pod red. Ju.N.Kuznecova,-K.: ООО «GNOZIS», 2012.-416 s. 4. Kuznecov Ju.M., Pridal'nij B.I. Privodi zatisknih mehanizmv metaloobrobnih verstativ: Monografija / Za zag. red. Ju.M.Kuznecova.- Luc'k: Vezha-Druk, 2016.-352 s. 5. Shinkarenko V.F., Kuznecov Ju.N. Mezhdisciplinarnyj podhod k modelirovaniju i sozdaniju slozhnyh jelektromehaničeskikh sistem na primere motor-shpindel'ej //Materiali Vseukraїn's'koї naukovo-praktičnoї konferencії «Suchasni tehnologiiї promisl'ovogo kompleksu». - Herson: HNTU, 2015.- s.8-13.

János Kundrák, Gyula Varga, Antal Nagy, Tamás Makkai
University of Miskolc, Hungary

EXAMINATION OF 2D AND 3D SURFACE ROUGHNESS PARAMETERS OF FACE MILLED ALUMINIUM SURFACES

Material removal with a rotating cutting tool has a series of special characteristics due to the movement relations. For face milling, looped cycloids occur, which also affects the roughness characteristics of the machined surface. This article analyses how the values of 2D and 3D roughness parameters change in symmetrical milling of flat surfaces of aluminium parts in planes parallel to the feed direction.

1 INTRODUCTION

Face milling is a high performance, widely used operation for machining flat surfaces. In recent years Wiper and CBN inserts have been introduced, which makes it possible to produce fine surfaces and efficient face milling of hardened surfaces. In the past, the goal was to achieve maximum performance, and the required surface integrity of the machined surface was also highlighted. In addition to good surface quality, to achieve the proper productivity, high-feed processes are beginning to emerge. To increase the feed rate v_f (mm/min), there are research goals and aspirations that aim at achieving values of a_p/f_z lower than 1 by increasing the feed per cutting edge and reducing the depth of cut a_p [1, 2].

There is no doubt that the changed feed rate significantly influences the shape of the cross-sectional area of the chip, the cutting forces and the surface roughness of the machined surface too. In the literature, the features of face milling, the characteristics of surface texture and the effect of cutting data on the roughness of the milled surface are widely discussed [1-4]. Parameters of technological parameters and surface integrity are examined [5]. Various models [1, 6, 7] can be used to calculate (estimate) surface roughness in face milling.

The characteristic feature of the face milling is that the rotating and feed direction movement of the tool causes the tool path to be a series of looped cycloids and chip removal is not limited to the number of cutting edges and the number of inserts, but also affected by the number of cutting edges (in cut simultaneously), tilting angle of the tool, tool position to the workpiece (displacement relative to each other), the width of the workpiece, etc.

Examining roughness is also of paramount importance because it is well-known that increasing the feed rate increases the surface roughness. Therefore, when planning the manufacturing of parts, it is necessary to take into account the maximum feed rate for which the roughness requirements are still satisfied.

The results of roughness experiments performed at different feed rates are published in this paper. In the studies we analysed the 2D and 3D roughness parameters, carrying out the analysis in different planes.

2 EXPERIMENTS

The aim of the experiments is to analyse the topography of the surfaces in planes parallel to the feed direction. The planes were taken from the centre line at 20 mm and the surface roughness was examined at five different feed rates (Figure 1).

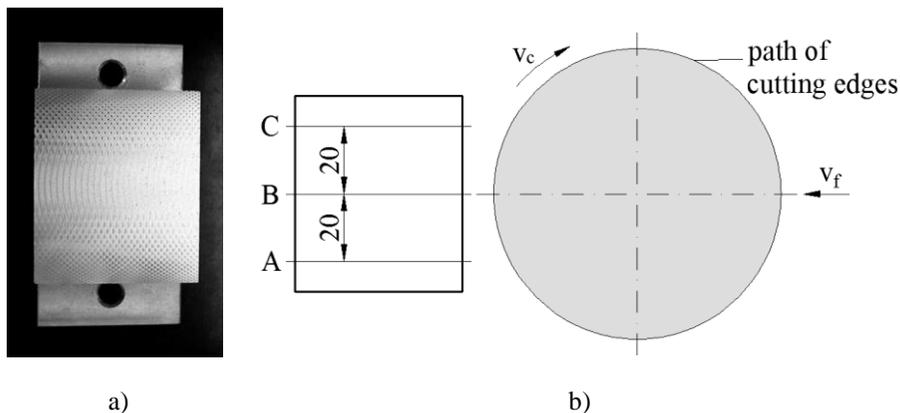


Figure 1 – The face milled surface and the measuring planes
 a) Characteristic traces of the face milled surface
 b) The places of roughness measurement on the milled surface

2.1 Experimental conditions

The machining (milling) experiments on aluminium alloy were carried out with inserts when the tool cutting edge angle $\kappa_r = 90^\circ$. The cutting data are summarized in Table 1.

Table 1 – Data of cutting experiment

No.	a_p [mm]	n [1/min]	v_c [m/min]	f_z [mm]	f [mm]
1	1.5	10000	1980	0.06	0.72
2				0.09	1.08
3				0.12	1.44
4				0.15	1.80
5				0.18	2.16

Additional conditions for machining were as follows:

Machine tool: Perfect Jet MCV-M8 (H) vertical milling machine

Tool: Lach Diamant D-MB-X3-063-08-Z12/P face milling cutter with 12 soldered PCD inserts, $D_s=63$ mm, $\kappa_r=90^\circ$

Workpiece: Grade AlSi9Cu3(Fe), width of cut surface: 58 mm, length: 50 mm

Figure 1 shows the specimen on which the measuring planes are also marked and the motion relations. Investigations in different planes are important because the surface roughness varies in different points of the face milled surface and in different measurement directions. The surfaces of the specimens were examined by the following measuring equipment.

Measuring machine: AltiSurf[®]520 3D surface roughness measuring machine

Measuring software: AltiMap Premium 6.2

2.2 Results and discussion

Experimental data for roughness values in 2D and 3D were examined. From the resulting profile diagrams, those for the two largest feed rates are shown in Figures 2 and 3.

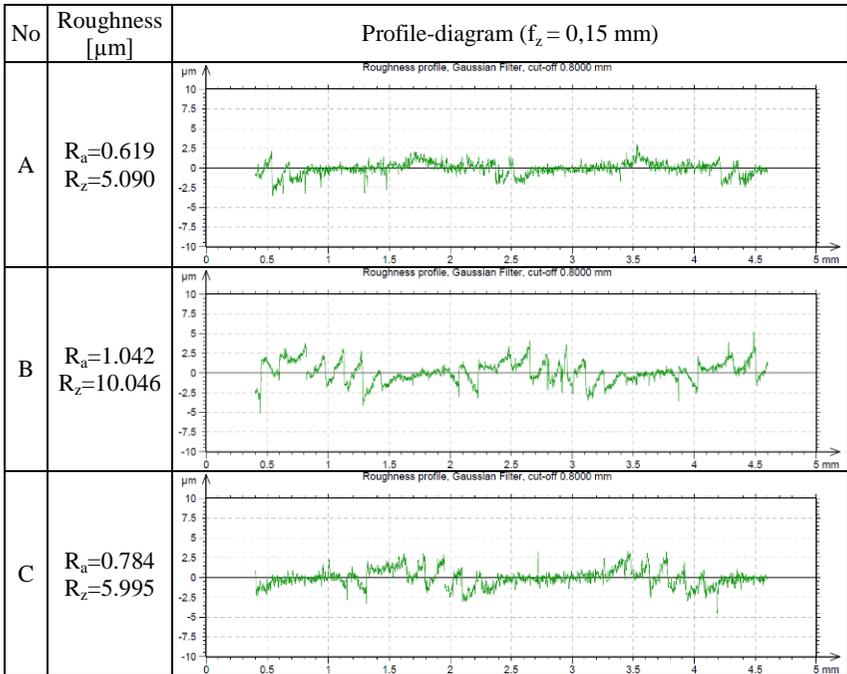


Figure 2 – Surface roughness for specimen 4

The roughness examinations were analysed for face milling with 1 insert in the 2D and 3D systems. Among the parameters measured in the 2D system, the R_a , R_q and R_z values were analysed. In the 3D system we also measured their equivalents: S_a , S_q and S_z . (Among the measured roughness parameters, the numerical values of R_a , R_z , R_q , S_a , S_z , S_{10q} are given.) In the 2D system, a profile diagram was taken, and the 3D system

was a topographic illustration. The face milling parameters and the measuring results can be found in Table 2.

From the measuring results, it can be seen that by increasing the f_z , the average roughness value of R_a doubled in both the middle and the parallel planes within the examined feed rate range. In the case of face milling, the theoretical values of the roughness parameters are reduced from the symmetry plane and are of the same value in the same distance planes in both sides. By reviewing the values in Table 2, it can be established that there is a difference between the roughness values of the A and C planes. The primary explanation for this is that on one side of the symmetry plane is up-milling and the down-milling on the other side.

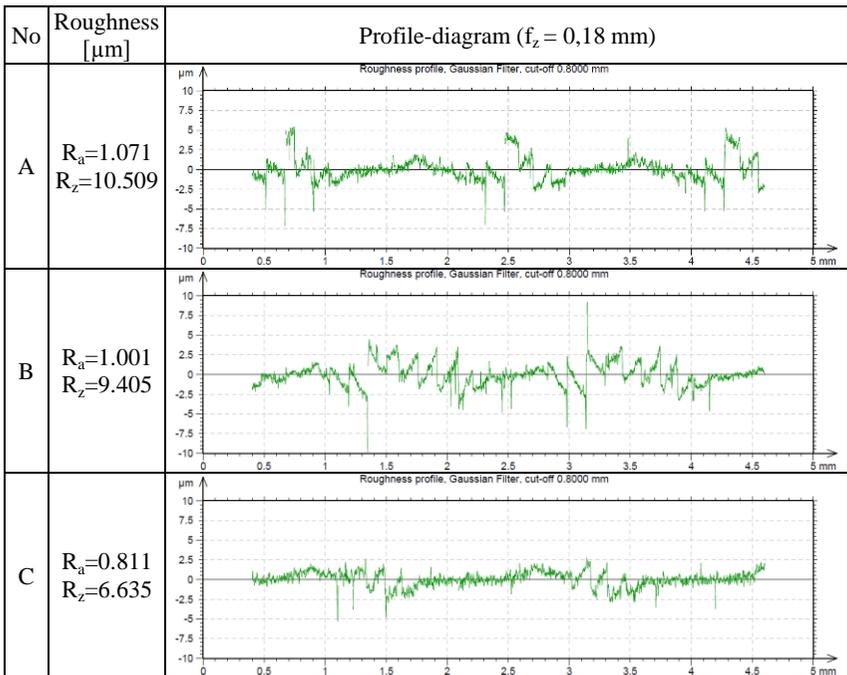


Figure 3 – Surface roughness for specimen 5

In line with our previous experience [8], the R_a and R_q parameters are similar in relation to each other, and their value is almost the same. Therefore, the usage of only one, the more general R_a is needed. The other finding is that neither R_a nor R_q reflects the change of roughness with sufficient sensitivity. It can be seen in Figures 2 and 3 that R_z responds more sensitively and more accurately to the change in roughness. This is why R_z is more frequently used in factories. Looking at Table 2, it can be stated that all roughness characteristics change in a similar way.

Table 2 – Summary of measured parameters of the surface roughness

No.	f_z [mm]	Side	R_a [μm]	R_z [μm]	R_q [μm]	S_a [μm]	S_z [μm]	S_q [μm]
1	0.06	Entry side	0.558	4.404	0.751	1.409	9.644	1.700
		Middle	0.499	3.777	0.667	1.423	11.954	1.863
		Exit side	0.576	4.325	0.755	1.516	10.536	1.854
2	0.09	Entry side	0.423	3.226	0.554	1.301	12.317	1.700
		Middle	0.532	3.647	0.668	1.258	11.082	1.678
		Exit side	0.475	3.193	0.607	1.341	13.293	1.744
3	0.12	Entry side	0.408	4.157	0.581	1.175	13.828	1.564
		Middle	0.492	3.226	0.612	0.937	17.262	1.222
		Exit side	0.384	2.751	0.501	1.142	13.029	1.496
4	0.15	Entry side	0.619	5.090	0.837	1.010	19.288	1.339
		Middle	1.042	10.046	1.565	0.942	20.132	1.245
		Exit side	0.784	5.995	1.018	0.955	21.173	1.285
5	0.18	Entry side	1.071	10.509	1.425	1.027	20.657	1.365
		Middle	1.001	9.405	1.284	1.086	23.876	1.479
		Exit side	0.811	6.635	1.044	0.974	21.144	1.306

The tendency in the 2D profiles seems to be an increase in the number of deep grooves growing by increasing the by feed per cutting edge (f_z). This is unfavourable for fatigue applications, but it is beneficial from the point of view of capability for oil.

In addition to the profile diagrams taken from the machined surface, the topographic figures also provide useful information. Here we show the topographic figures belonging to the two highest feed rates of the 5 cases examined. The 3D profile figures are characterized by a distinct convexity which is proportional to the feed rate value. The micro-geometric shape of the surface can be said to be regular.

A convexity corresponds to one rotation of the tool. It is obvious that in the parallel planes the direction of the groove is different and because the axis of the milling cutter was perpendicular to the surface, the traces caused by the edge also appeared there too.

In our experiments we worked with commercial milling heads and commercial inserts. Even at the highest feed rate – in the examined interval – we have received smaller R_z values than, for example, the value prescribed for the milled machined surface of a gearbox made of this material.

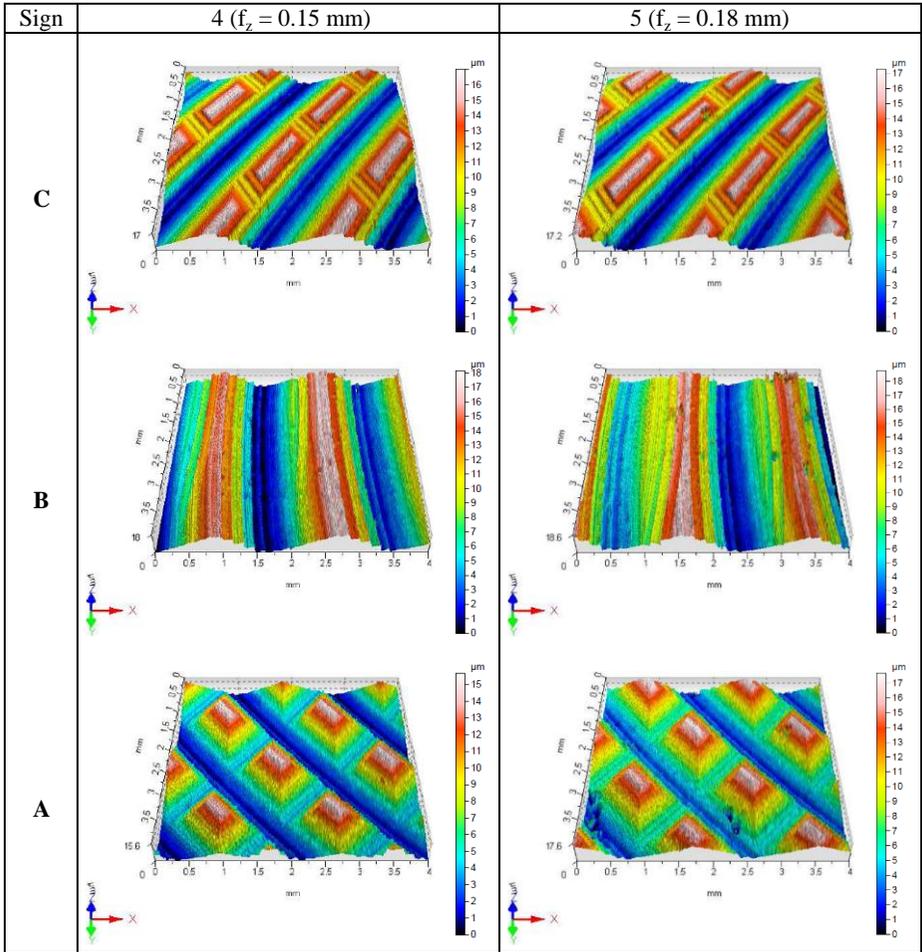


Figure 4 – 3D topography of the milled surface

When removing a constant value cross sectional area, increasing the feed per tooth of the cutter (chip thickness is increasing as well), the cutting force decreases, and the mechanical power necessary for chip removal decreases, too [9]. Starting from this, by further increasing the feed rate, the increase in the cutting force will be slower, so the extent of the cutting force will be less than the limit of the increase of the feed rate. Rather, roughness values may limit the choice of the feed values.

3 CONCLUSION

In this paper, the roughness of the face milled surface was analysed with a face milling cutter. It was found that the roughness values in the planes parallel to

the plane of symmetry differ. Although the theoretical values of the roughness values are the same in equal planes, they differ in the machined surface. This can be partially explained by the fact that the plane of symmetry is up-milling one side and down-milling the other side.

In the examined interval, with increasing feed per tooth of the cutter (f_z) roughness values gradually decrease. At the same time, the roughness value is significantly lower than the allowable values for such surfaces, which allows for further feed increase.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors greatly appreciate the support of the National Research, Development and Innovation Office of Hungary – NKFIH (No. of Agreement: K 116876).

This study was carried out as part of the EFOP-3.6.1-16-00011 “Younger and Renewing University – Innovative Knowledge City – institutional development of the University of Miskolc aiming at intelligent specialization” project implemented in the framework of the Szechenyi 2020 program. The realization of this project is supported by the European Union, co-financed by the European Social Fund.

References: 1 Karpuschewski B., Batt S.: **Improvement of Dynamic Properties in Milling by Integrated Stepped Cutting**, CIRP Annals - Manufacturing Technology 56:(1) pp.85-88. (2007); 2 Karpuschewski, B., Kundrák, J., Emmer, T., Borysenko, D.: **A new strategy in face milling - inverse cutting technology**, Solid State Phenomena 261: pp.331-338. (2017); 3 Mohammadjafar Hadad, Mohammedjavad Ramezani: **Modelling and analysis of a novel approach in machining and structuring of flat surfaces using face milling process**, Int. Journal of Machine Tools and Manufacture 105: pp.32-44. (2016); 4 Felhő, C., Kundrák, J.: **Comparison of theoretical and real surface roughness in face milling with octagonal and circular inserts**, Key Engineering Materials, 581, pp.360-365. (2014); 5 Hamed Hassanpour, Mohammad H. Sadeghi, Amir Rasti, Shaghayegh Shajari: **Investigation of surface roughness, microhardness and white layer thickness in hard milling of AISI 4340 using minimum quantity lubrication**, Journal of Cleaner Production 120: pp.124–134. (2016); 6 Patricia Muñoz-Escalona, Paul G. Maropoulos: **A Geometrical Model for Surfaces Roughness Prediction When Face Milling Al7075-T7351 With Square Insert Tools**, Journal of Manufacturing Systems 36: pp.216–223. (2015); 7 Felho Cs.: Karpuschewski B., Kundrák J.: **Surface roughness modelling in face milling**, Procedia CIRP 31: pp.136-141. (2015); 8 Kundrák J., Gyáni K, Felho C, Deszpoth I: **The effect of the shape of chip cross section on cutting force and roughness when increasing feed in face milling**, Manufacturing Technology 17:(3) pp.335-342. (2017)

János Kundrák, Viktor Molnár, István Deszpoth, Tamás Makkai
University of Miskolc, Hungary

EFFECT OF CUTTING DATA SELECTION ON PRODUCTIVITY IN FACE MILLING

Face milling as a cutting procedure is used for high productivity manufacturing of prismatic components. In the automotive industry, characterized by mass production, the enhancement of productivity is a primary goal for manufacturing companies. There is a wide range of methods for increasing productivity. This paper analyses how productivity can be increased by the machining time, material removal rate and surface rate by choosing the appropriate cutting data. Cutting experiments were carried out for machining prismatic components and the change in machining time was analysed. It was proved that within the performance limits of the WGMT (Workpiece – Gadget – Machine – Tool) system a significant amount of manufacturing time and therefore cost can be saved while the geometric accuracy and surface quality of the component remain as specified in the blueprint.

1. INTRODUCTION

Increasing the machining efficiency of surfaces with different shape and quality became extremely important in recent decades in the automotive industry because the number of machined parts produced in great masses increased significantly. Moreover, in mass production an infinitesimal decrease in the machining time of one workpiece means a significant increase in total annual revenue and profit. The conditions for competitiveness of automotive industrial companies are the enhancement of production efficiency, innovation, and profitability. Considering the analysis of efficiency from a technical point of view, it can be approached from numerous directions: choosing the proper machining procedure or version of the procedure, optimization of cutting data, and performance enhancement of machine tools and equipment. Not only technological but also manufacturing process organization possibilities are available, and they become more and more important in cost-efficient manufacturing of the whole lot size [1]. In any of these improvement directions a company intends to offer its product to the customer at lower cost and higher profit. If the machining time of a component or a lot becomes lower as the result of a certain improvement, the production of more or other components can be undertaken in the extra free time. This results in higher profit as well as increased revenue and cost. If the goal is not volume increase, then the production cost of the fixed number components can be decreased, which also facilitates an increase in profit. Previous analyses introduced the effects of procedure choice on productivity [2, 3]. In [4] the material removal rate of hard turning, grinding and the combination of them was analysed in a detailed manner. When machining prismatic components not only the proper determination of the tool path or the material removal strategy but also the determination of the cutting data for decreasing machining time is of critical importance nowadays [5, 6]. In milling, as in other types of machining, a necessary

condition that changes in the cutting data must not negatively affect the surface quality and accuracy specifications of the component [7, 8, 9]. When making technological decisions, economic factors also have to be considered. The effect of cutting data on the intensity of material removal is analysed in the paper in case of face milling.

2. PARAMETERS CHARACTERIZING MATERIAL REMOVAL EFFICIENCY

One alternative for analyzing the efficiency of cutting procedure is their comparison on the basis of the cutting parameters. These characterize a certain type of technology intensity. They are the following:

- material removal rate – Q_w [mm³/s],
- surface rate – A_w [mm²/s].

Q_w expresses how many units of material can be cut during one unit of time and A_w expresses how many units of surface area can be finished during one unit of time with a given procedure. The theoretical values of cutting parameters can be exactly calculated using the technological data of the given cutting procedure. The cutting parameters for face milling can be calculated as follows:

$$Q_w = a_p \cdot a_e \cdot v_f \text{ (mm}^3\text{/s)} \quad (1)$$

$$A_w = a_e \cdot v_f \text{ (mm}^2\text{/min)}, \quad (2)$$

where a_p is depth of cut [mm]; a_e is width of cut [mm]; v_f is feed rate [mm/min].

From the equations for Q_w and A_w it can be seen that the calculation of the two parameters differs only in the depth of cut. In our case depth of cut can basically be considered as fixed (in the analyzed case it is the almost same volume of material that can be removed in one pass) and therefore it is enough to analyze the factors influencing the surface rate. Since the diameter of the milling tool always exceeds the variable width of the workpiece surfaces when machining prismatic components whose surfaces are machined by face milling, the length of the tool path has to be taken into account instead of the a_e value influencing the size of machined surface (Eq.(3)).

$$A_w = L \cdot v_f \text{ [mm}^2\text{/min)}, \quad (3)$$

where L is length of tool path [mm].

In machining plane surfaces of a concrete block-like part the length of tool path remains the same even if the cutting data are changed. Thus the surface rate (and the efficiency of machining) is influenced basically only by the v_f feed rate. The v_f feed rate in face milling can be calculated as follows:

$$v_f = f_z \cdot z_s \cdot n_s \text{ [mm/min]}, \tag{4}$$

where f_z is feed per edge [mm/pc]; z_s is the number of cutting edges [pcs]; n_s is revolutions per minute (*rpm*) [1/min].

From the formula of feed rate v_f it can be seen that the surface rate can be increased by:

1. increasing the feed per edge (f_z);
2. increasing the number of cutting edges (z_s);
3. increasing the *rpm* (or cutting speed).

Accordingly, to increase the efficiency two parameters are chosen. Feed was determined by recommendations in the literature and on the basis of experimental results. The increase of number of cutting edges z_s of a given tool construction can be ensured by the increase of the tool diameter, so this goal can be reached by choosing a higher diameter tool. In this paper, however, the number of cutting edges is considered as fixed. Increase in the *rpm* of the tool (n_s) is possible due to the aluminum-alloy specific cutting characteristics of a diamond tool, taking into consideration the performance limits of the machine tool.

3. CONDITIONS OF THE EXPERIMENT

The goal of the experiments was to measure the base time of face milling operation components when machining prismatic components. This served as the basis for calculating the main and additional machining time. A matrix is constructed to introduce the experiment plan for increasing f_z and v_c (or n_s). The values used in the current technology are considered as the basic parameters ($d_s=63$ mm [$z_s=12$], $n_s=12500$ 1/min, $f_z=0.12$ mm). Four values of the feed per cutting edge were analyzed at three *rpm* values. The v_f/v_{f0} cells of the Table 1 show in percentage form how the feed rate (v_f) changes with the base feed rate (v_{f0}). The base value is considered as 100%; the change in main machining time is the reciprocal value of this. The experiment plan is summarized in Table 1.

Table 1 – Experiment plan experiment

d_s [mm]	n_s [1/min]	v_f [mm/min]	f_z [mm/edge]				
			z_s [-]	v_c [m/min]	v_f/v_{f0} [%]	0.12	0.13
63 (12)	12500 (2474)	v_f		18000	19500	21000	22500
		v_f/v_{f0}		100	108	117	125
	13000 (2573)	v_f		18720	20280	21840	
		v_f/v_{f0}		104	113	121	
	13500 (2672)	v_f		19440	21060	22680	
		v_f/v_{f0}		108	117	126	

The experiment was carried out on workpieces in production. The base time of face milling was defined as the period between the end of milling tool manipulation and the end of positioning to tool change coordinates after machining the plane surfaces.

Main specifics of the experiment:

Machine tool: DMG MORI DMC 60 H linear type machining center

Tool: Lach Diamant MB-X3-063-08-Z12/P type soldered diamond insert face milling head; $d_s=63$ mm, $z_s=12$, $\kappa_r=90^\circ$

Workpiece material: AISi9Cu3(Fe)

Cutting data:

- cutting speed: $v_c=2474-2672$ m/min
- rpm of main spindle: $n_s=12500-13500$ 1/min
- depth-of-cut: $a_p=1.5$ mm (average)
- feed per one cutting edge: $f_z=0.12-0.15$ mm/edge

4. EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION

The analysis was carried out on the machining time data. In the currently applied technology, machining time is:

$$t_m=t_b-t_a=19.35-13.9=5.45 \text{ s,} \tag{5}$$

where t_m is main machining time; t_b is base time; t_a us additional machining time.

For the component of the experiment the machining time, the change of it in percentage form, and the change of adjusted machining time (referring to one workpiece) were determined in each experimental setup. The data are given in Table 2. The change in machining times is plotted in Fig. 1.

Table 2 – Time data and cutting data of the components of the experiment

№	n_s [1/min]	f_z [mm/edge]	v_f [mm/min]	v_f/v_{f0} [%]	t_m		Δt_m [s/pcs]
					[s]	[%]	
1	12500	0.12	18000	100.00	5.45	100.00	0.00
2		0.13	19500	108.33	5.03	92.31	-0.42
3		0.14	21000	116.67	4.67	85.71	-0.78
4		0.15	22500	125.00	4.36	80.00	-1.09
5	13000	0.12	18720	104.00	5.24	96.15	-0.21
6		0.13	20280	112.67	4.84	88.76	-0.61
7		0.14	21840	121.33	4.49	82.42	-0.96
8	13500	0.12	19440	108.00	5.05	92.59	-0.40
9		0.13	21060	117.00	4.66	85.47	-0.79
10		0.14	22680	126.00	4.33	79.37	-1.12

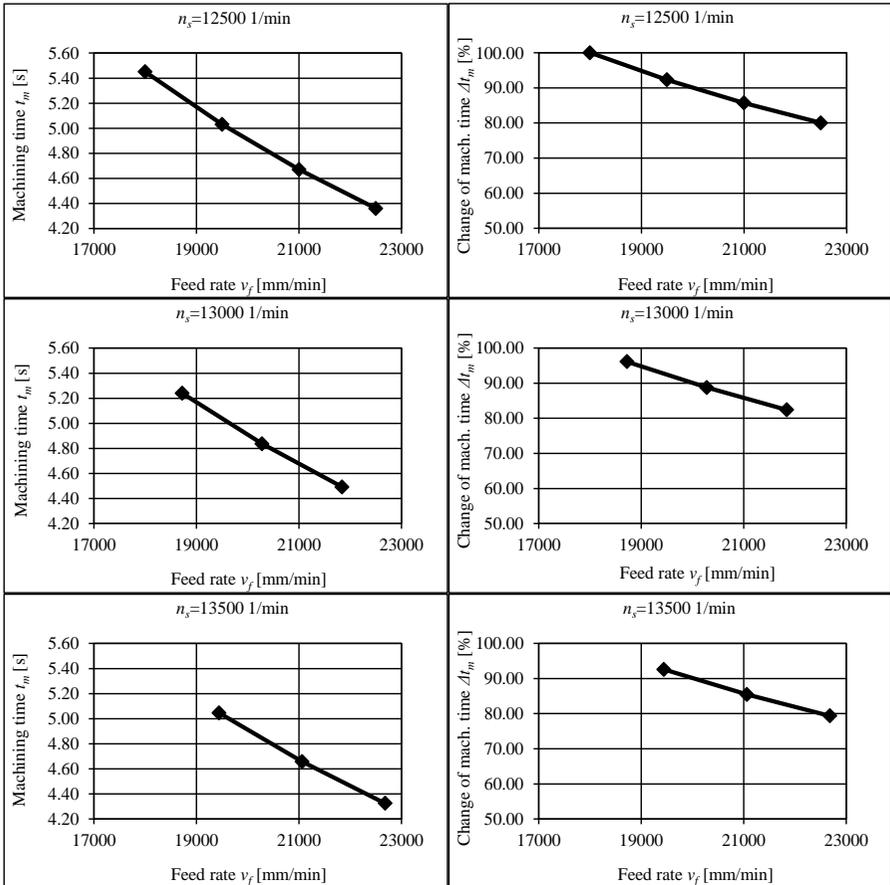


Figure 1 – Change in machining time with feed rate

From the results it can be stated that the strategy determined on the basis of the surface rate, the material removal rate and time analysis proved valid. The two alternatives, namely increasing of *rpm* and feed rate, allow reduction of machining time in the current machining system. In each experimental setup time was saved, i.e. increasing the *rpm* from 12500 to 13500 resulted in the reduction of machining time to 92.6%. Increasing the feed rate (in the case of $f_z=0.14$ mm/edge) at the three *rpm* values reduced the machining times to 86, 82 and 79%, respectively.

In serial manufacturing the reduction of machining time results in the reduction of operation time, too. This reduction allows extra free capacity while the direct and indirect costs of manufacturing can also decrease. It was shown that increasing the values of cutting data increases material removal rate and surface rate, which measure the intensity of the applied technology. The change in cutting

data influences the WGMT system. When taking improvement measures the performance limits of the system have to be considered. If the increase in cutting values remains within the load bearing capacity of the machine tools, a significant amount of cost can be saved by the intervention.

5. SUMMARY

In machining aluminum components produced in large lot sizes the material removal rate and surface rate proved to be an efficient method to determine intensity. Using these rates, cutting data can be provided that will help in increasing the productivity and profitability compared to the current technology, if correctly chosen. Changing each of the two analyzed parameters (f_z and v_c) can save time, but a parallel change of both allows the reduction of machining time by 15–20%, which is significant in the case of large lot sizes.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors greatly appreciate the support of the National Research, Development and Innovation Office – NKFIH (No. of Agreement: K 116876).

This study was carried out as part of the EFOP-3.6.1-16-00011 “Younger and Renewing University – Innovative Knowledge City – institutional development of the University of Miskolc aiming at intelligent specialization” project implemented in the framework of the Szechenyi 2020 program.

References: 1 Tamás, P., Illés, B., Dobos, P.: **Waste reduction possibilities for manufacturing systems in the industry 4.0**, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 161, pp.1-8. (2016). 2 Klocke, F., Brinkmeier, E., Weinert, K. **Capability profile of hard cutting and grinding process**, Annals of the CIRP 54(2), pp.22-54. (2005). 3 Tóth, T., Kundrák, J., Gyáni, K.: **The removal rate as a parameter of qualification for hard turning and grinding**, Tools and Methods of Competitive Engineering Vol. 1 and 2, pp.629-639. (2004). 4 Kundrák, J., Deszpoth, I., Molnar, V.: **Comparative study of material removal in hard machining of bore holes**, Tehnicki Vjesnik-Technical Gazette 21(1), pp.183-189. (2014). 5 Perez, H., Rios, J., Diez, E., Vizan, A.: **Increase of material removal rate in peripheral milling by varying feed rate**, Journal of Materials Processing Technology 201(1–3), pp.486-490. (2008). 6 Budak, E., Tekeli, A.: **Maximizing chatter free material removal rate in milling through optimal selection of axial and radial depth of cut pairs**, CIRP Annals 54(1), pp.353-356. (2005). 7 Kundrák, J., Makkai, T., Markopoulos, A.P.: **Investigating the impact of feed and cutting speed on cutting forces for the increase of surface removal rate in face milling**, Rezanie i Instrumenty v Tekhnologicheskikh Sistemah 87(1), pp.126-132. (2017). 8 Hadad, M., Ramezani, M.: **Modelling and analysis of a novel approach in machining and structuring of flat surfaces using face milling process**, Int. Journal of Machine Tools and Manufacture 105, pp.32-44. (2016). 9 Kundrák, J., Gyáni, K., Felhő, C., Deszpoth, I.: **The effect of the shape of chip cross section on cutting force and roughness when increasing feed in face milling**, Manufacturing Technology 17(3), pp.335-342. (2017).

УДК 621.865 (075)

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

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИПУСКА НА ЗУБОШЛИФОВАНИЕ

Апробовано теоретико-імовірнісний підхід в задачі моделювання припуску на зубошлифування, відповідно до якого припуск містить дві компоненти: систематичну, викликану векторної сумою кінематичного і геометричного ексцентриситетів зубчастого колеса, і випадкову, обумовлену дією незалежних випадкових величин. Запропоновано новий метод моделювання припуску – на основі віртуальних приладів для синтезу і перетворення сигналу припуску.

Ключові слова: зубошлифування, моделювання припуску

Апробирован теоретико-вероятностный подход в задаче моделирования припуска на зубошлифование, в соответствии с которым припуск содержит две компоненты: систематическую, вызванную векторной суммой кинематического и геометрического эксцентриситетов зубчатого колеса, и случайную, обусловленную действием независимых случайных величин. Предложен новый метод моделирования припуска – на основе виртуальных приборов для синтеза и преобразования сигнала припуска.

Ключевые слова: зубошлифование, моделирования припуска

The theoretical-probabilistic approach is tested in the problem of modeling a stock allowance for gear grinding, in accordance with which the allowance contains two components: systematic, caused by the vector sum of the kinematic and geometric eccentricities of gear wheel, and the random one, due to the action of independent random variables. A new method of the allowance simulation is proposed, which is based on virtual instruments for synthesis and transformation of the allowance signal.

Keywords: gear grinding, allowance simulation

1. Постановка проблемы. Для определения припуска на зубошлифование можно воспользоваться теоретико-вероятностным подходом [1, 2], однако для этого необходимо иметь возможность разделить сигнал припуска на детерминированную и случайную компоненту [3]. Или доказать наличие случайной компоненты при известной детерминированной компоненте, например в условиях дискретного выборочного измерения припуска на отдельных равноотстоящих впадинах зубчатого колеса. Для этого существует два пути: или сбор экспериментальных статистических данных в заводских условиях на реальных зубчатых колесах разного типоразмера или разработка имитационной модели припуска на основе имеющихся выборочных заводских измерений. Первый путь отличается высокой трудоёмкостью и необходимостью иметь современное прецизионное метрологическое обеспечение (аппаратное и программное). Второй – связан с проблемой разработки математической модели припуска, которую можно настраивать на основе выборочных экспериментальных данных.

2. Анализ последних исследований и публикаций. Теория определения припуска на механическую обработку является одним из основных разделов технологии машиностроения [4] и связана с общей проблемой моделирования технологических процессов [5]. Эту проблему пытаются решить на основе теоретико-вероятностного подхода [6], который в отличие от классического подхода [4] не связан с обязательным учётом ограниченного числа факторов (высота микронеровностей, дефектный слой, пространственные отклонения, погрешность установки). Теоретической предпосылкой для теоретико-вероятностного подхода является центральная предельная теорема А.М. Ляпунова, позволяющая ввести в модель припуска нормальный закон распределения случайной величины.

На современных зубошлифовальных станках с ЧПУ имеется возможность измерить припуск перед обработкой с помощью встроенных измерительных систем контактного типа. В качестве измерительного инструмента используют или шлифовальный круг, или тактильный датчик системы Renishaw. Известно, что припуск на зубошлифование содержит совокупность погрешностей, вызванных предыдущими операциями, и погрешность установки заготовки на зубошлифовальном станке [7-9]. Для сложнопрофильных деталей типа зубчатых колёс это положение остается в силе, но для определения погрешности базирования необходим функциональный пересчёт, учитывающий положение обрабатываемых поверхностей относительно технологических баз зубчатого колеса. Закономерная синусоидальная составляющая припуска с периодом 2π , обусловленная погрешностью базирования, вызвана отклонением центра заготовки зубчатого колеса от центра вращения планшайбы зубошлифовального станка [9].

Фактически после термической обработки делительная окружность зубчатого колеса получает случайное искажение формы, которое приводит к появлению дополнительной составляющей к указанной закономерной синусоидальной компоненте. Для определения фактического центра зубчатого венца строят среднюю окружность, располагая ее таким образом, чтобы расстояние от контура делительной окружности до средней окружности являлось наименьшим [7]. Фактический замкнутый контур делительной окружности представляют в виде периодической функции с периодом 2π и заменяют контур делительной окружности тригонометрическим рядом Фурье. Причем первый член ряда Фурье представляет собой основную гармонику, имеющую период 2π . Этот член ряда характеризует смещение оси вращения колеса относительно его геометрической оси – эксцентриситет. В работе [9] отмечается, что средняя линия окружности проводится таким образом, чтобы центр окружности совпадал с точкой, относительно которой все расстояния до любой точки контура имели бы наименьшую дисперсию. Из представленного в работе [9]

определения средней линии следует, что замкнутый искаженный контур делительной окружности заменяют средней линией, уравнение которой может быть получено методом наименьших квадратов. В той же работе [9] имеются данные по оценке отклонений длины общей нормали зубчатых колес, которые по данным автора являются случайными, имеющими центр группирования и среднеквадратическое отклонение в предположении нормального закона распределения погрешностей после зубонарезания и химико-термической обработки.

3. Целью статьи является апробирование теоретико-вероятностного подхода в задаче моделирования припуска на зубошлифование, а именно доказательство случайного характера соответствующей компоненты при имеющейся детерминированной составляющей. На этой основе строится моделирование и имитационное исследование по разработанной модели припуска на зубошлифование (modelling and simulation) по методике, описанной в работе [10].

4. Материалы исследования. Известно, что фактический припуск на зубошлифование на практике определяют через длину общей нормали. Поэтому, можно предположить, что случайное изменение длины общей нормали обуславливает случайное изменение припуска. Таким образом, появляется идея о случайной составляющей в припуске.

В соответствии с теоретико-вероятностным подходом, всякое отклонение величины какого-либо параметра от требуемого значения предполагается состоящим из двух частей: систематической (детерминированной, периодической, синусоидальной, регулярной) и случайной (аперiodической, стохастической, иррегулярной) [2]. В этой связи можно предположить, что величина припуска на зубошлифование содержит две составляющие: систематическую и случайную. При отсутствии измерений припуска на зубошлифовальном станке это предположение носит формальный характер. В то же время при наличии встроенных систем измерения припуска на станках с ЧПУ, например, на зубошлифовальном станке с ЧПУ HÖFLER RAPID 1250, данное предположение получает дальнейшее развитие. Например, при решении задачи определения максимального припуска на зубошлифование при ограниченном числе измерений.

Как следует из анализа Б.А. Тайца [9] геометрическое (векторное) суммирование кинематического и геометрического эксцентриситетов, в конечном счете, обуславливает синусоидальное распределение припуска по периферии зубчатого колеса. Такое распределение обуславливает детерминированную или систематическую составляющую припуска, поскольку эту составляющую находят по детерминированной функции.

На основе проведенных экспериментальных и теоретических исследований установлено, что в сигнале припуска содержится

систематическая синусоидальная компонента, вызванная погрешностью базирования (геометрический эксцентриситет или векторная сумма предыдущего кинематического и текущего геометрического эксцентриситетов) и другие компоненты [11]. Если эти компоненты случайны, то возможна научная гипотеза о том, что сигнал припуска содержит систематическую синусоидальную и случайную компоненты. Эта гипотеза является исходной предпосылкой для разработки теории определения припуска на основании его дискретных равноотстоящих (по центральному углу зубчатого колеса) измерений. Для доказательства предположения о случайности одной из двух компонент припуска необходимо проверить соответствие распределения величины этой компоненты нормальному закону. Для этого используют аналитический способ проверки соответствия опытного распределения нормальному распределению, например, с помощью критерия W для выборок объемом от 3 до 50 результатов [12].

Рассмотрим методику имитационного моделирования припуска на примере результатов его измерения для 3-х зубчатых колес типа В1318В.41.004 (код завода-изготовителя). Параметры колес: $z=29$; $m=7$ мм; $d_a=233,4$ мм; $d_b=199,3473$ мм; $d_f=207,0270$ мм; ширина зуба $B=60$ мм; коэффициент смещения исходного контура $x=0,545$; угол профиля $\alpha=20^\circ$; угол наклона зуба $\beta=-18^\circ$.

Например, для зубчатого колеса № 1 первичные результаты измерения припуска по левой $z^L(n)$ и правой $z^R(n)$ сторонам 29 впадин показаны графически (рис. 1).

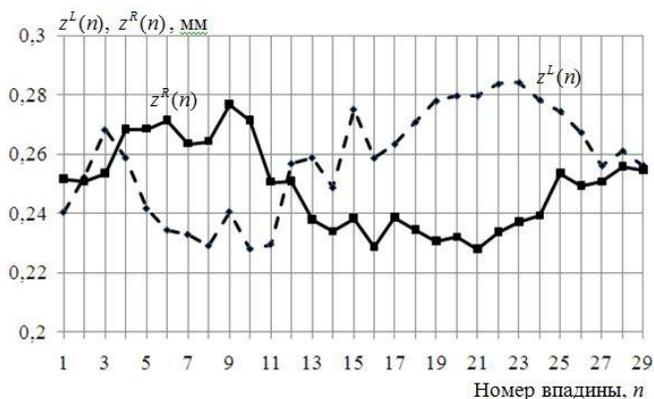


Рисунок 1 – Распределение припуска по правой $z^R(n)$ и левой $z^L(n)$ стороне впадин заготовки зубчатого колеса после выравнивания минимальных значений припуска

Данные на рис.1 нормируют путем вычитания соответствующих постоянных составляющих по левой z_{ave}^L и правой z_{ave}^R сторонам впадин (рис. 2), т.е.

$$z_{rated}^L(n) = z^L(n) - z_{ave}^L, \quad (1)$$

$$z_{rated}^R(n) = z^R(n) - z_{ave}^R. \quad (2)$$

В свою очередь в соответствии с теоретико-вероятностным подходом переменную составляющую лево- и правостороннего припуска представим в виде суммы двух компонент [3]: систематической x_β и случайной x_γ , например, для левой стороны получим

$$z_{rated}^L(n) = x_\beta + x_\gamma. \quad (3)$$

Зависимость (3) соответствует аддитивной модели зашумлённого сигнала [13].

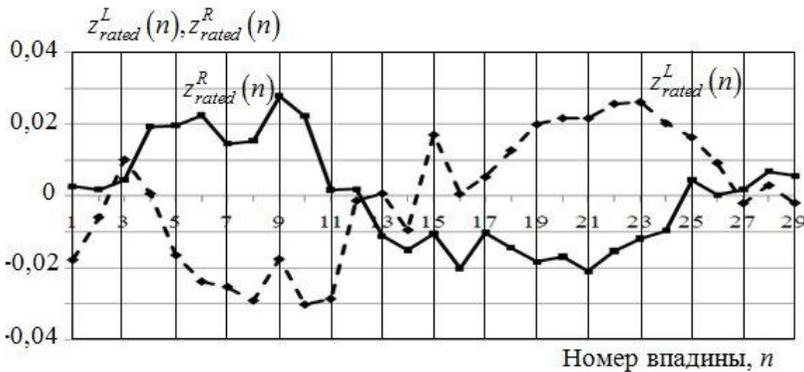


Рисунок 2 – Нормированный сигнал припуска для левой $z_{rated}^L(n)$ и правой $z_{rated}^R(n)$ сторон впадин

Далее рассмотрим нормированный сигнал, например, левостороннего припуска $z_{rated}^L(n)$ (рис. 3). Разделим этот сигнал на систематическую и случайную составляющие по следующей методике.

1. Из суммарного сигнала припуска $z_{rated}^L(n)$ вычитают гармоническую составляющую x_β , полученную с помощью метода наименьших квадратов

(рис. 3). Получают сигнал припуска x_γ , который не содержит систематическую составляющую.

2. Для сигнала x_γ определяют критерий W в соответствии с известной методикой [12].

3. Сравнивают значение критерия W с табличным значением W^* .

4. Гипотеза о нормальности закона распределения справедлива при $W > W^*$.

Для преемственности исходных данных, помещённых на рис. 1 и рис. 2 (отсчёт переменной n по оси абсцисс 1...29), с последующими временными и частотными зависимостями (отсчёты 0...28 и 0...2 π) на рис. 3 показаны обе оси абсцисс.

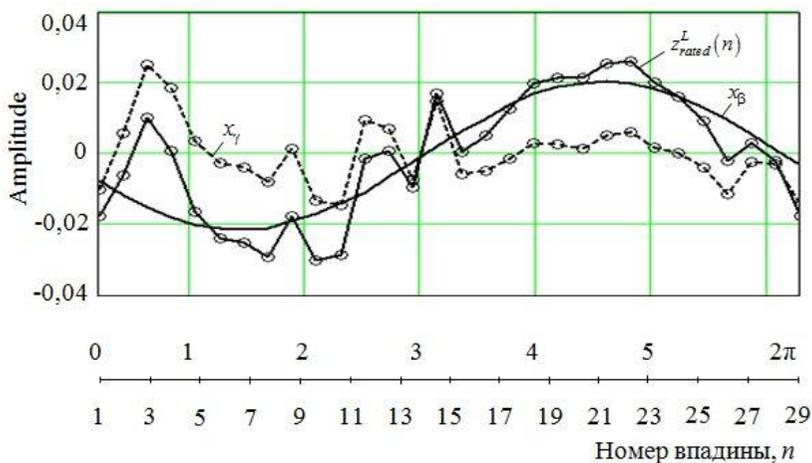


Рисунок 3 – Представление исходного нормированного сигнала припуска

$$z_{rated}^L(n) \text{ в виде суммы двух компонент: } x_\beta \text{ и } x_\gamma$$

Например, для левостороннего припуска критерий $W = 0,959141$. При доверительной вероятности 95 % $W^* = 0,927$. Таким образом, сигнал x_γ (рис. 3) подчиняется нормальному закону распределения. Аналогичные процедуры проверки на нормальность выполнены для экспериментальных данных по 3-м зубчатым колесам того же типоразмера (см. табл.).

Таблица – Экспериментальное определение критерия W

Номер ЗК	1	2	3
	Значение критерия W		
Левая сторона	0,959141	0,937549	0,952079
Правая сторона	0,950315	0,948181	0,941853

Таким образом, анализируемые дискретные значения случайной компоненты припуска χ_γ подчиняются нормальному закону распределения, что можно назвать необходимым условием случайного процесса.

Другим способом, доказывающим, что эти дискретные значения припуска относятся к случайному процессу, является проверка известного свойства случайного процесса: Например, свойство эргодичности стационарного случайного процесса, заключается в следующем: усреднение ансамбля реализаций случайного процесса по множеству приводит к тому же результату, что усреднение одной реализации по времени. Причем это приводит к уменьшению и в пределе к исчезновению амплитудного спектра случайного процесса [14]. Однако для приближения к пределу необходимо иметь достаточное количество реализаций случайного процесса, 3-х реализаций не достаточно. Для увеличения количества реализаций, т.е. для создания ансамбля реализаций, разработана имитационная модель в среде LabVIEW 8.6. Модель представляет собой виртуальный прибор (рис.4), позволяющий генерировать реализации случайного процесса – случайной составляющей сигнала припуска. Для этого формируют соответствующий нормированный дискретный сигнал припуска в виде электронной таблицы отсчетов для программы LabVIEW 8.6, например, в виде текстового файла. В среде LabVIEW 8.6 программируют виртуальный прибор (рис. 4) для выполнения быстрого преобразования Фурье (БПФ), на вход которого поступают данные о нормированных сигналах из сформированных текстовых файлов.

Для работы в среде LabVIEW 8.6 с сигналом припуска необходимо работать с блоками Simulate Arbitrary Signal, которые вызываются палитрой Functions. При вызове блока Simulate Arbitrary Signal (блок 1 на рис.4) открывается окно Configure Simulate Arbitrary Signal, в котором необходимо выбрать Define Signal. В открывшемся окне Define Signal есть возможность задания сигнала (X , Y) с клавиатуры или путем считывания созданного текстового файла сигнала, который сохранен в формате *.lvm* (читается и редактируется в программе Excell). В данном случае все сигналы о припуске (припускограммы) были сохранены в соответствующих файлах с форматом *.lvm* и загружены с помощью клавиши Load Data в окне Define Signal. В блоке 2 выполнена процедура БПФ.

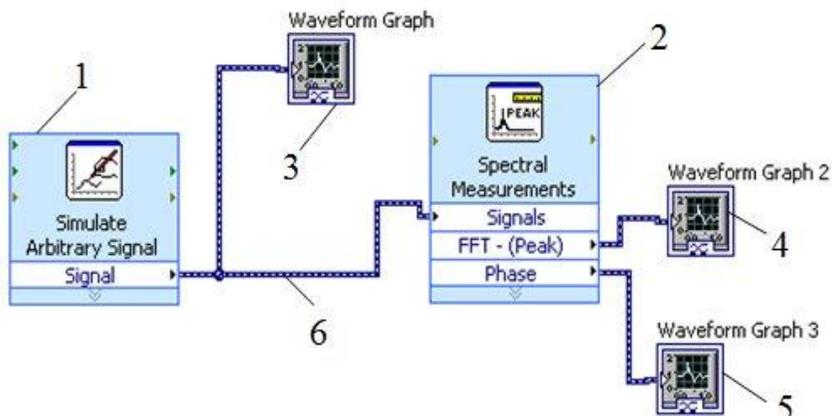


Рисунок 4 – Виртуальный прибор для выполнения БПФ в среде LabVIEW 8.6

Графическое изображение исходного сигнала о припуске в виде его амплитудного (рис. 5) и фазового спектра выведено на лицевую панель виртуального прибора. Этот вывод данных выполняют с помощью блоков индикации Waveform Graph (блоки 3, 4 и 5 на рис. 4). Эти блоки находятся в палитре Controls → Graph Indicators. Сигналы распространяются по блок-диаграмме посредством виртуальных линий связи 6 (рис. 4).

Исходный сигнал о припуске, измеренном на зубошлифовальном станке с ЧПУ HÖFLER RAPID 1250, можно записать, например, для левой стороны впадин измеряемого зубчатого колеса, в виде дискретной функциональной зависимости

$$f(n) = z_{rated}^L(n). \quad (4)$$

Для измеренных на указанном станке зубчатых колёс (ЗК), соответствующие временные и частотные зависимости для ЗК №1, ЗК № 2 и ЗК № 3 можно представить в виде

$$f_1(n) = z_{rated}^{L1}(n), \quad F\{f_1(n)\} = F\{z_{rated}^{L1}(n)\}, \quad (5)$$

$$f_2(n) = z_{rated}^{L2}(n); \quad F\{f_2(n)\} = F\{z_{rated}^{L2}(n)\}, \quad (6)$$

$$f_3(n) = z_{rated}^{L3}(n); \quad F\{f_3(n)\} = F\{z_{rated}^{L3}(n)\}. \quad (7)$$

В качестве примера рассмотрим спектрограмму (рис. 5, а) для ЗК №1 с исходным сигналом припуска $f_1(n) = z_{rated}^{L1}(n)$, содержащим систематическую и случайную компоненты по формуле (3). После удаления из этого сигнала систематической компоненты x_β путём её вычитания из исходного сигнала (рис. 3) виртуальный прибор (рис. 4) формирует спектр случайной составляющей x_γ сигнала припуска (рис. 5, б) на котором хорошо видно отсутствие первой гармоники этого сигнала.

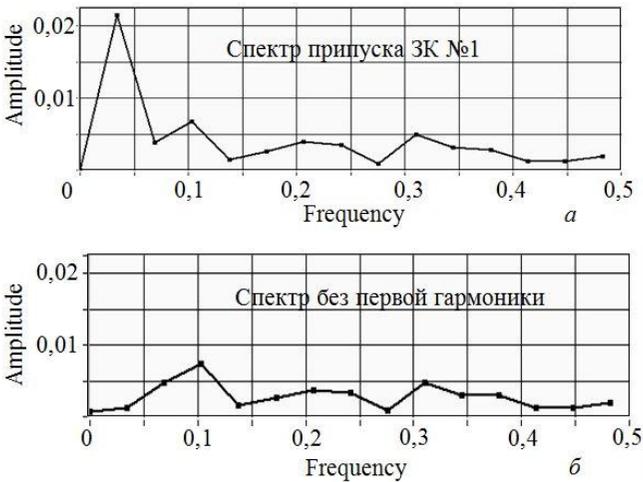


Рисунок 5 – Амплитудный спектр исходного сигнала $z_{rated}^L(n)$ припуска (а) и его случайной компоненты x_γ (б), не содержащей первую гармонику

Разработанный виртуальный прибор является моделью припуска на зубошлифование [10], содержащей временную (или пространственную) и частотную характеристику припуска в виде отдельной реализации случайного процесса, которая может имитировать результаты измерения припуска на отдельном зубчатом колесе. На основе этого виртуального прибора может быть создана статистическая многоканальная модель для получения ансамбля реализаций припуска (рассмотрена далее), что позволяет изучать припуск на зубошлифование путём его имитационного моделирования.

5. Выводы и перспективы развития

1. На основании экспериментального измерения припуска для 3-х зубчатых колёс получены временные (исходные) и частотные (после БПФ) характеристики сигнала припуска.

2. Выявлен гармонический состав сигнала припуска, содержащий систематическую (синусоидальную) и случайную компоненты.

3. Установлен нормальный закон распределения случайной компоненты припуска, измеренного в заводских условиях.

4. Из предварительного анализа следует, что спектр усредненной предполагаемой случайной компоненты X_{γ} должен иметь слабую тенденцию к исчезновению, что подтверждает правомерность предположения о наличии случайной компоненты X_{γ} . Поскольку данная тенденция в одной реализации сигнала припуска слабо выражена, достоверность данного вывода требуется подтвердить дополнительно (следует далее).

Список использованных источников: 1. Хусу А.П. Шероховатость поверхностей (теоретико-вероятностный подход), под ред. А.А. Первозванского / А.П. Хусу, Ю.Р. Витенберг, В.А. Пальмов. – М.: Наука, 1975. – 344 с. 2. Ларшин В.П. Теоретико-вероятностный и частотный подходы в технологическом анализе / В.П. Ларшин, Н.В. Лиценко, В.В. Нежебовский // Фізичні та комп'ютерні технології. Матеріали ХХІІ Міжнар. науков.-практичн. конф., 7-9 грудня 2016 р. – Харків. – Д: ЛІРА, 2016, С. 208-212. 3. Лиценко Н.В. Разделение профиля поверхности на систематическую и случайную составляющие / Н.В. Лиценко, В.П. Ларшин // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб. . – Харьков: НТУ «ХПИ», 2016. – С. 62-73. 4. Лиценко Н.В. Анализ способов определения припуска на механическую обработку / Н.В. Лиценко, В.П. Ларшин, С.Н. Макаров // Праці Одеського політехнічного університету: Науковий та науково-виробничий збірник. – Одеса, 2011. – Вип. 1(35). – С.36-42. 5. Гришкевич А.В. Проектирование операций механической обработки / А.В. Гришкевич, И.Л. Цымбал. – Х: Вища шк. Изд-во при Харьк. ун-те, 1985. – 144 с. 6. Васин А.Н. Теоретико-вероятностные основы формирования припуска на механическую обработку / А.Н. Васин. – Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2006. – 128 с. 7. Пономарев В.П. Оптимизация процессов механической обработки зубчатых колес / В.П. Пономарев. – Челябинск: Южно-Уральское кн. изд-во, 1974. – 268 с. 8. Качество изготовления зубчатых колёс / А.В. Якимов, Л.П. Смирнов, Ю.А. Бояришинов и др. – М.: Машиностроение, 1979. – 191 с. 9. Тайц Б.А. Точность и контроль зубчатых колёс / Б.А. Тайц. – М.: Машиностроение, 1972. – 368 с. 10. Larshin V.P. Grinding system modelling and simulation / V.P. Larshin, N.V. Lishchenko // Современная наука: проблемы, инновации, решения – IV: материалы науч.-практ. конф. с междунар. участием. (Курск, 15-16 декабря 2016 г.). – Курск: ООО "Учитель", 2016. – С. 13-18. 11. Ларшин В.П. Исследование технологической системы зубошлифования / В.П. Ларшин, Н.В. Лиценко // Перспективні технології та прилади. – Луцьк: Луцький НТУ, 2017. – С.104-114. 12. Рего К.Г. Метрологическая обработка результатов измерения / К.Г. Рего. – К.: Техніка, 1987. – 128 с. 13. Харкевич А.А. Борьба с помехами / А.А. Харкевич, изд. второе испр. – М.: Наука, 1965. – 275 с. 14. Гутников В.С. Фильтрация измерительных сигналов / В.С. Гутников. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990. – 192 с.

Bibliography (transliterated): 1. Khusu A.P., Vitenberg Yu.R., Pal'mov V.A. Sherokhovatost' poverkhnostey (teoretiko-veroyatnostnyy podkhod), pod red. A.A. Pervozvanskogo /. – М.: Nauka, 1975. – 344 s. 2. Larshin V.P., Lishchenko N.V., Nezhebovskiy V.V. Teoretiko-veroyatnostnyy i

chastotnyy podkhozdy v tekhnologicheskoy analiz. – Fizichni ta komp'yuterni tekhnologii. Materiali KhKhII Mizhnar. nauk.- praktichn. konf., 7-9 grudnya 2016 r. – Kharkiv. – D: LIRA, 2016, S. 208-212. **3.** Lishchenko N.V., Larshin V.P. Razdelenie profilya poverkhnosti na sistematicheskuyu i sluchaynyuyu sostavlyayushchie. – Rezanie i instrument v tekhnologicheskikh sistemakh: Mezhdunar. nauch.-tekh. sb. . – Khar'kov: NTU «KhPI», 2016. – S. 62-73. **4.** Lishchenko N.V., Larshin V.P., Makarov S.N. Analiz sposobov opredeleniya pripuska na mekhanicheskuyu obrabotku. – Pratsi Odes'kogo politekhnichnogo universitetu: Naukoviy ta naukovo-virobnichiy zbirnik. – Odesa, 2011. – Vip. 1(35). – S.36-42. **5.** Grishkevich A.V., Tsybmal I.L. Proektirovanie operatsiy mekhanicheskoy obrabotki. – Kh: Vishcha shk. Izd-vo pri Khar'k. un-te, 1985. – 144 s. **6.** Vasin A.N. Teoretiko-veroyatnostnye osnovy formirovaniya pripuska na mekhanicheskuyu obrabotku. – Saratov: Sarat. gos. tekhn. un-t, 2006. – 128 s. **7.** Ponomarev V.P. Optimizatsiya protsessov mekhanicheskoy obrabotki zubchatykh koles. – Chelyabinsk: Yuzhno-Ural'skoe kn. izd-vo, 1974. – 268 s. **8.** Kachestvo izgotovleniya zubchatykh koles / A.V. Yakimov, L.P. Smirnov, Yu.A. Boyarshinov i dr. – M.: Mashinostroenie, 1979. – 191 s. **9.** Tayts B.A. Tochnost' i kontrol' zubchatykh koles. – M.: Mashinostroenie, 1972. – 368 s. **10.** Larshin V.P., Lishchenko N.V. Grinding system modelling and simulation. – Sovremennaya nauka: problemy, innovatsii, resheniya – IV: materialy nauchn.-prakt. konf. s mezhdunar. uchastiem. (Kursk, 15-16 dekabrya 2016 g.). – Kursk: OOO "Uchitel", 2016. – S. 13-18. **11.** Larshin V.P., Lishchenko N.V. Issledovanie tekhnologicheskoy sistemy zuboshlifovaniya – Perspektivni tekhnologii ta priladi. – Luts'k: Luts'kiy NTU, 2017. – S.104-114. **12.** Rego K.G. Metrologicheskaya obrabotka rezul'tatov izmereniya. – K.: Tekhnika, 1987. – 128 s. **13.** Kharkevich A.A. Bor'ba s pomekhami, izd. vtoroe ispr. – M.: Nauka, 1965. – 275 s. **14.** Gutnikov V.S. Fil'tratsiya izmeritel'nykh signalov. – L.: Energoatomizdat. Leningr. otd-nie, 1990. – 192 s.

УДК 621.791:621.926

В.Г. Лебедев, д-р техн. наук, О.В. Фроленкова, Одесса, Украина

КОНТАКТНЫЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ШЛИФОВАНИИ ТЕРМОБАРЬЕРНОГО ПОКРЫТИЯ ZrO_2 КРУГАМИ ИЗ СИНТЕТИЧЕСКИХ СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

Предметом дослідження є моделювання процесу шліфування напиленого керамічного шару для управління контактними температурами і залишковими напруженнями в напиленому шарі на основі діоксиду цирконію при шліфуванні алмазними і ельборовими кругами. Показано, що при глибинах шліфування порядку 0,03 мм температура шліфування практично вся поглинається напиленим шаром без теплового впливу на основний метал

Ключові слова: діоксид цирконію, теплозахисне покриття, контактні температури

Предметом исследования является моделирование процесса шлифования напылённого керамического слоя для управления контактными температурами и остаточными напряжениями в напылённом слое на основе диоксида циркония при шлифовании алмазными и эльборовыми кругами. Показано, что при глубинах шлифования порядка 0,03 мм температура шлифования практически вся поглощается напылённым слоем без теплового воздействия на основной металл

Ключевые слова: диоксид циркония, теплозащитное покрытие, контактные температуры

The subject of the study is the simulation of the process of grinding of a sprayed ceramic layer to control contact temperatures and residual stresses in this layer based on zirconium dioxide when grinding with diamond and borazon wheels. It is shown that at grinding depths of the order of 0.03 mm, the grinding temperature is practically all absorbed by the deposited layer without thermal influence on the base metal

Keywords: zirconia dioxide, heat-shielding coating, contact temperature

Введение. Для защиты жаропрочных сплавов от высокотемпературного окисления широко применяются термобарьерные покрытия. К термобарьерным покрытиям предъявляются три основных требования: низкая температуропроводность, устойчивость к образованию трещин при высоких температурах, увеличение срока службы. Следует отметить еще дополнительные требования к термобарьерным такие, как: сопротивление эрозии, невосприимчивость к внешним повреждениям, сопротивление химическому взаимодействию с частицами присутствующими в газе, такими как сера и ванадий или кальций-магний-алюмо-силикаты. Наиболее полно этим требованиям отвечает термобарьерное покрытие из ZrO_2 .

Для окончательной точности и шероховатости напыленной поверхности все покрытия деталей ГТУ должны проходить механическую размерную обработку, как правило это шлифование.

В процессе шлифования возникают высокие контактные температуры,

© В.Г. Лебедев, О.В. Фроленкова, 2018

величины которых сопоставимы с рабочими температурами или же несколько выше этих температур. При шлифовании напыленная поверхность подвергается практически мгновенному нагреву и очень быстрому охлаждению, что может вызвать высокие значения остаточных напряжений в шлифованном слое и трещины этого слоя. В этом случае резко снижается надежность и долговечность шлифованных поверхностей, а следовательно, всей детали в целом.

Таким образом одной из основных задач технологического процесса шлифования является управление тепловым режимом обработки, чтобы избежать критических значений остаточных напряжений в керамическом слое.

Цель работы: Разработать методику получения значений контактных температур и по глубине напыленного слоя при шлифовании кругами (эльбор, СА, электрокорунд) используя математическое моделирование, что может дать возможность эффективно управлять температурным режимом при обработке и не допускать возникновения тепловых дефектов

Результаты исследований. Для создания модели источника тепла, в первую очередь необходимо знать единичную силу P_Z , которая достаточно точно определяется при шлифовании металлических сплавов по значению предела прочности на растяжение и сдвиг, и по величине площади контакта зерна с металлом. Однако для ZrO_2 нет надежных данных по этим величинам, но есть хорошо проверенные данные твердости по Виккерсу (микротвердость), поэтому, в настоящей работе вначале определялась сила P_Y , по методике, предложенной Редько [1] (вдавливание алмазной пирамидки на определенную глубину).

Это дало возможность по величине углубления зерна в металл определять величину P_Y , а потом P_Z , как $0,55P_Y$. В результате получается простая зависимость (1):

$$P_Z(t) = 7,15 \times H_V \times h(t)^2 \times k_d \quad (1)$$

Кроме того, при шлифовании покрытия из ZrO_2 керамическим кругом, теплофизические покрытия и круга оказываются близки друг к другу и тепловой поток от единичного зерна практически делится пополам между керамическим покрытием и режущим зерном (если считать распределение теплового потока пропорциональным коэффициенту тепловой активности (2)):

$$\varepsilon = \sqrt{\lambda C \rho} \quad (2)$$

Однако, при шлифовании синтетически сверхтвёрдыми материалами, картина кардинально меняется. Так, если коэффициент тепловой активности, ZrO_2 равен $1,1 \cdot 10^3 \text{ Дж/м}^2 \text{ } ^\circ\text{C с}^{0,5}$, то коэффициент тепловой активности эльборового зерна порядка $9,92 \cdot 10^3 \text{ Дж/м}^2 \text{ } ^\circ\text{C с}^{0,5}$, а алмазного зерна $16 \cdot 10^3 \text{ Дж/м}^2 \text{ } ^\circ\text{C с}^{0,5}$. Это означает, что при резании основной тепловой поток пойдет в зерно и можно ожидать существенного понижения температуры, по сравнению с электрокорундом.

Для того, чтобы определить тепловой поток в пятне контакта круга с деталью, необходимо знать число реально режущих зерен, которые по различным источникам [1, 2] составляют 11,5%. Проверить это можно только экспериментально при помощи так называемых полуискусственных микротермопар [3]. В данной работе использован метод, который дает возможность определять мгновенную температуру резания отдельными зернами T_m , контактную температуру шлифуемой поверхности T_k , являющуюся результатом суммарного действия множества тепловых импульсов.

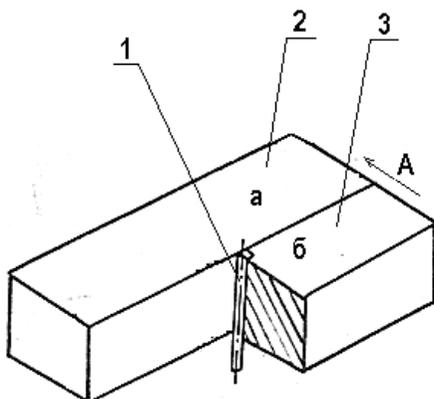


Рисунок 1 – Образец для измерения температуры методом полуискусственной термопары:
1- термоэлектрод, 2- часть образца а, 3- часть образца б,
А- направление шлифования (Образец электропроводен)

Данный метод является наиболее доступным и удобным. Он дает возможность увидеть распределение температуры в зоне резания и позволяет производить регистрацию и измерение температур резания отдельных абразивных зерен непосредственно в зоне шлифования. Одним из электродов такой микротермопары является обрабатываемая деталь, а вторым

термоэлектродом является константановая проволока диаметром 6-20 мкм [3].

Взяв за основу данный метод в результате шлифования, мы получаем реальный тепловой импульс, состоящий из микроимпульсов от каждого режущего зерна (Рис. 2). Зная количество микроимпульсов, скорость развертки и скорость движения стола, можно определить реальное количество режущих зерен в пределах дуги контакта круга с изделием. После чего используя зависимость [1, 2], можно определить удельное число режущих зерен в поверхности шлифовального круга.

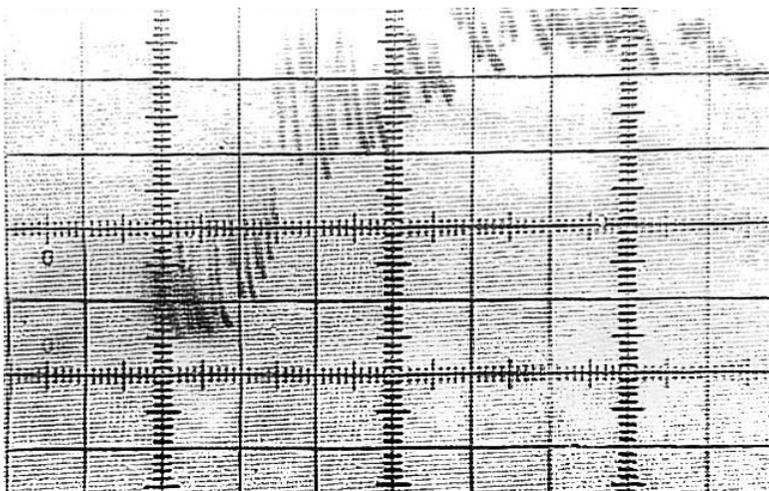


Рисунок 2 – Характерный тепловой импульс зарегистрированный микротермопарой

Многokrатно повторяя данные эксперимента при различных режимах, удалось вывести эмпирические формулы, по которым можно было определить фактическое расстояние между зернами, а также удельное число зерен шлифовального круга, после чего разработать матмодель для определения контактных температур и остаточных напряжений. Результаты расчетов по разработанной модели представлены на рис. 3 и 4.

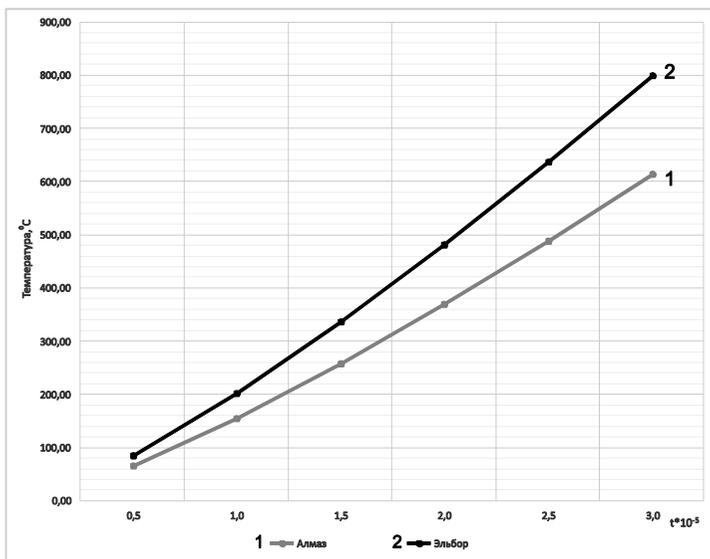


Рисунок 3 – Значения контактных температур на поверхности при шлифовании кругами: 1 – круг АСП 160x125K1 100%; 2 – круг ЛЮ 160x125K1 100%

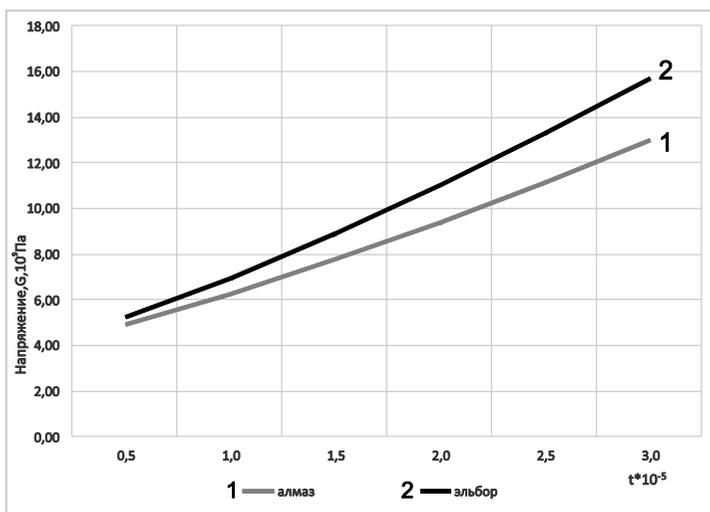


Рисунок 4 – Значения остаточных напряжений на поверхности напыленного слоя при шлифовании кругами: 1 – круг АСП 160x125K1 100%; 2 – круг ЛЮ 160x125K1 100%.

Сравнивая результаты расчетов приведенные на рис. 2 и 3, можно сказать, что при шлифовании алмазным кругом, показатели остаточных напряжений и температуры на поверхности напыленного слоя, наилучшие.

Выводы:

1. Расчеты, проведенные по разработанной математической модели, показывают, что при достаточно напряженных режимах шлифования кругами из эльбора температура шлифования, находящаяся в диапазоне ниже 700⁰С тепловое поле, практически не проходит толщину напыленного слоя до 2 мм. Таким образом, основной металл детали фактически не подвержен тепловому воздействию.

2. При алмазном шлифовании температуры еще ниже, поэтому основной металл практически не подвергается тепловому воздействию.

3. Недостатком циркониевого покрытия, можно считать большой коэффициент теплового расширения, что приводит к значительным величинам шлифовочных напряжений.

4. Как показывают результаты расчетов при шлифовании алмазными кругами опасность появления трещин у напыленного слоя при глубинах шлифования порядка 0,02мм. При шлифовании эльборовыми кругами опасность появления трещин примерно на глубине 0,015мм.

Для уменьшения величины шлифовочных остаточных напряжений целесообразно промоделировать шлифование с применением СОЖ.

Список использованных источников: 1. *Редько С.Г.* Процессы теплообразования при шлифовании металлов / С.Г.Редько. – Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 1986. – 231 с. 2. *Маслов Е.Н.* Теория шлифования материалов / Е.Н.Маслов. – М. : Машиностроение, 1984. – 320 с. 3. *Н.Н. Клименко, В.Г. Лебедев, и др.* Методика измерения температур шлифования термopарами при обработке наплавленных и напыленных поверхностей машиностроительных деталей. Физические и компьютерные технологии (Труды 20-й Междунпродной научно-практической конференции, 23-24 декабря 2014). – Д: ЛИРА. – Харків, 2015. – С. 34-38.

Bibliography (transliterated): 1. Red'ko S.G. Processy teploobrazovanija pri shlifovanii metallov. – Saratov : Izd-vo Sarat. un-ta, 1986. – 231 s. 2. Maslov E.N. Teorija shlifovanija materialov. – M. : Mashinostroenie, 1984. – 320 s. 3. N.N. Klimenko, V.G. Lebedev, i dr. Metodika izmerenija temperatur shlifovanija termoparami pri obrabotke naplavlennyh i napylnennyh poverhnoستهj mashinostroitel'nyh detalej. Fizicheskie i komp'juternye tehnologii (Trudy 20-j Mezhdunprodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii, 23-24 dekabrya 2014). – D: LIRA. – Harkiv, 2015. – S. 34-38.

Н.В. Лищенко, канд. техн. наук, Одесса, Украина

РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПРИПУСКА НА ОСНОВЕ ТЕОРЕТИКО-ВЕРОЯТНОСТНОГО ПОДХОДА

Досліджено новий метод статистичного імітаційного моделювання припуску на зубошлифування, виконуваного за методом копіювання на верстаті з ЧПК. Створена і налаштована статистична модель припуску за результатами його експериментального вимірювання на реальних зубчастих колесах в заводських умовах. Виконано імітаційне моделювання припуску з оцінкою випадкової компоненти припуску на основі властивості ергодичності для стаціонарного випадкового процесу.

Ключові слова: зубошлифування, статистична модель припуску

Исследован новый метод статистического имитационного моделирования припуска на зубошлифование, выполняемого по методу копирования на станке с ЧПУ. Создана и настроена статистическая модель припуска по результатам его экспериментального измерения на реальных зубчатых колесах в заводских условиях. Выполнено имитационное моделирование припуска с оценкой случайной компоненты припуска на основе свойства эргодичности для стационарного случайного процесса.

Ключевые слова: зубошлифование, статистическая модель припуска

A new method of statistical simulation of a stock allowance for gear grinding, performed by the form grinding method on a CNC machine, is investigated. A statistical model of the allowance is created and tuned according to the results of its experimental measurement on real gear wheels in the factory. Simulation modeling of the allowance was performed with an estimate of the random component of the allowance based on the ergodicity property for a stationary random process.

Keywords: grinding, statistical model of allowance

1. Постановка проблеми. Експериментальні статистичні дослідження, пов'язані з визначенням погрешностей виготовлення цементованих зубчастих коліс відрізняються високою трудомісткістю і вимагають прецизійних вимірних приладів спеціального призначення, або займають дорогоцінне час сучасних контрольних-вимірних машин. Задача моделювання вказаних погрешностей після хіміко-термічної обробки зубчастих коліс особливо актуальна в зв'язі з незадовільним якістю контролюваних поверхонь зубчастих коліс, в результаті чого щуп контрольної-вимірної машини часто працює не в штатній ситуації з частими аварійними зупинками. Крім того, порушення принципу єдинства баз при виміренні і обробці призводить до додаткової погрешності базирования і спотворення результатів контролю. При використанні теоретико-ймовірнісного підходу до дослідження припуску на зубошлифування виникає задача оцінювання характеристик випадкового процесу при аналізі детермінованої і випадкової компонент припуску на зубошлифування. В попередній частині

исследования указывалось, что проверка нормальности закона распределения случайной величины, например, с помощью критерия W , является необходимым, но не достаточным условием нормального закона

распределения. Поэтому существует проблема замены трудоёмкого статистического исследования погрешностей реальных зубчатых колёс статистическим моделированием этих погрешностей. Эта проблема в полной мере относится к статистическому исследованию припуска на зубошлифование, который обусловлен совокупностью погрешностей предыдущих операций и погрешностью установки на зубошлифовальном станке.

2. Анализ последних исследований и публикаций. Вопросы разделения погрешностей на систематические и случайные при расчёте точности обработки, анализ статистического метода определения погрешностей с точки зрения его возможностей и недостатков, и сопутствующие вопросы были в свое время рассмотрены проф. А.П. Соколовским, который предложил термины «статистический метод» и «расчётный метод» в технологическом анализе. Им установлено, что погрешности, являвшиеся систематическими в пределах одной настройки, принимают характер случайных для всей совокупности обследуемых операций [1].

Проф. В.К. Старков отмечает, что главные недостатки статистических моделей – их громоздкость и трудоёмкость, а также большое число реализаций для нахождения искомых параметров с приемлемой точностью. При статистическом моделировании необходима генерация значений случайного параметра, которая производится одним из методов получения случайных величин с заданным законом распределения. При этом основные методы моделирования случайных величин с заданным законом распределения заключаются в преобразовании случайных чисел с равномерным законом распределения. Например, в качестве случайных чисел с усеченным нормальным распределением используется сумма нескольких независимых случайных чисел с равномерным распределением. Такой подход основан на центральной предельной теореме теории вероятности, в силу которой сумма независимых случайных величин при весьма общих условиях имеет асимптотически нормальное распределение [2]. Однако вопросы создания статистической модели припуска и его имитационное моделирование в литературе не отражены. В то же время актуальность такой работы высока в связи с появлением высокопроизводительных зубошлифовальных станков с ЧПУ [3, 4].

3. Цель исследования заключается в обосновании разработанной статистической модели припуска, содержащей детерминированную и случайную компоненты на основании использования известного свойства эргодичности случайных процессов.

4. Материалы исследований. Свойство эргодичности состоит в том, что среднее по множеству реализаций с вероятностью единица совпадает со средним по времени одной реализации процесса [5]. Это позволяет при ограниченной длине одной реализации (для зубчатого колеса длина одной реализации равна центральному углу 2π) заменять её среднее по времени средним по множеству реализаций. В теории случайных процессов множество реализаций называют ансамблем реализаций, который и задаёт случайный процесс. Другими словами, при недостаточной длине реализации случайного процесса (для зубчатого колеса длина пространственного интервала изменения припуска 2π) его можно задавать математической моделью – ансамблем реализаций, а среднее по времени заменять средним по множеству. Это вызвано тем, что для стационарных эргодических процессов статистические характеристики, полученные усреднением по множеству реализаций и по времени для одной реализации случайного процесса равны друг другу [6]. Подтверждением этого свойства является известная теорема Парсевала или Рэйли (в зарубежной литературе Parseval's theorem, Rayleigh's energy theorem).

Амплитудный спектр случайного процесса за счёт случайных фазовых соотношений частотных компонент имеет тенденцию к исчезновению, что при достаточной длине реализации случайного процесса вызвано компенсирующим взаимодействием гармоник со случайными фазами. Поэтому для характеристики интенсивности случайных процессов применяют не амплитудный спектр, а энергетический спектр (power spectrum), так как он не зависит от фаз гармоник [7]. На указанном свойстве исчезновения амплитудного спектра случайного процесса основано дальнейшее исследование.

Экспериментальное исследование припуска на заводских зубчатых колесах (ЗК №1, ЗК № 2 и ЗК № 3) позволили получить соответствующие пространственные (аналог термина «временные») сигналы припуска и их спектрограммы для 3-х левосторонних припусков для указанных зубчатых колес (рис. 1, *a*, *b*, *c*) и спектрограмму от среднего по времени (рис. 1, *z*). Последнюю спектрограмму получили в виде преобразования Фурье от среднего по времени из сигналов $f_1(n) = z_{rated}^{L1}(n)$, $f_2(n) = z_{rated}^{L2}(n)$ и $f_3(n) = z_{rated}^{L3}(n)$, т.е. от сигнала следующего типа (рис. 1, *z*)

$$f_{ave}(n) = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 z_{rated}^{Li}(n). \quad (1)$$

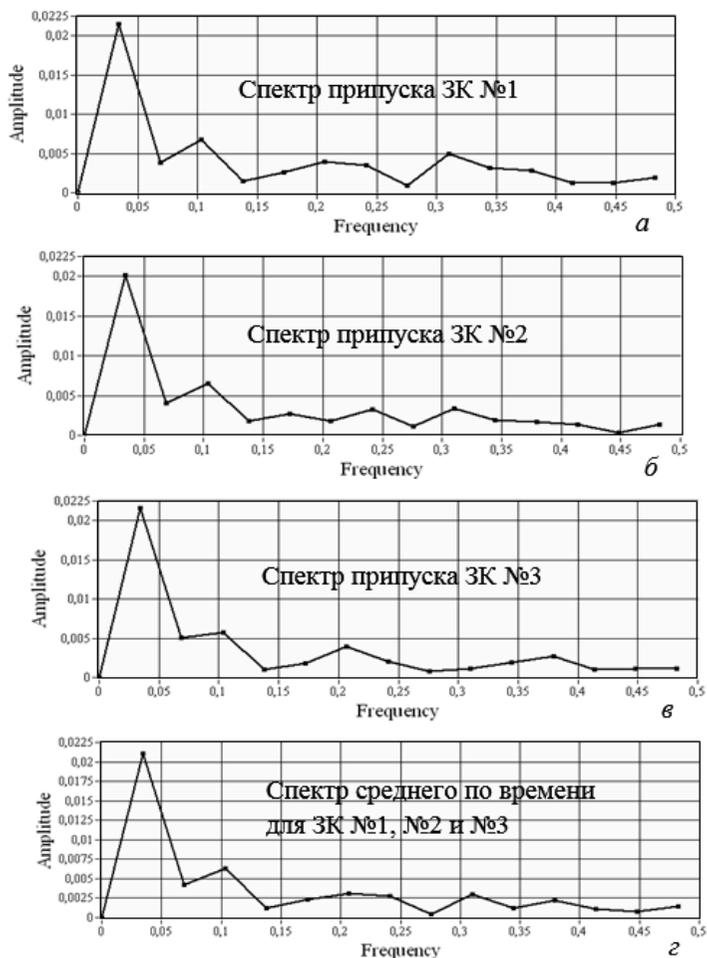


Рисунок 1 – Амплитудные спектры нормированных сигналов левостороннего припуска: а, б, в – зубчатые колеса № 1, № 2, № 3, соответственно; г – для усредненного временного сигнала припуска

Это преобразование Фурье, т.е. спектр среднего значения сигнала припуска, можно представить в виде

$$F \{ f_{ave}(n) \} = F \left\{ \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 z_{rated}^{Li}(n) \right\} \quad (2)$$

Для реализации преобразований (1) и (2) сконструирован виртуальный прибор в среде LabVIEW 8.6 (рис. 2).

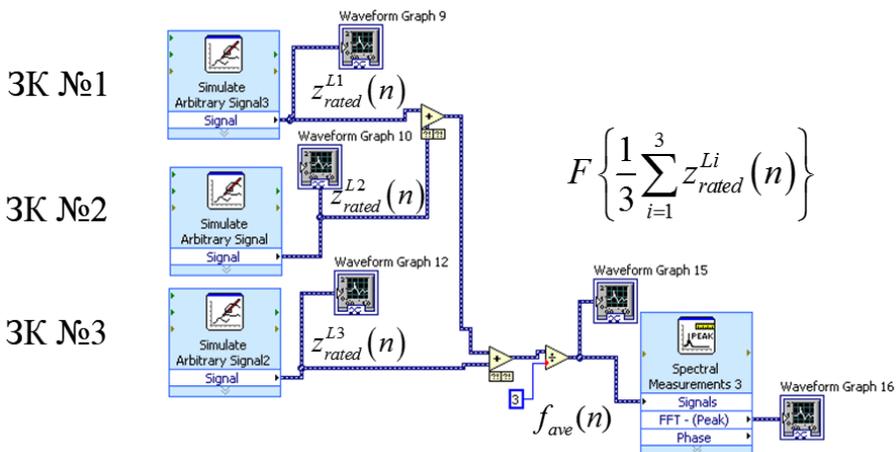


Рисунок 2 – Виртуальный прибор для усреднения 3-х сигналов припуска и формирования спектра среднего

Исходный сигнал припуска $f_{ave}(n)$ (рис. 3), сформированный виртуальным прибором (рис. 2), подобен сигналу припуска для ЗК №1. Аналогичное подобие имеет место для амплитудных спектров этих сигналов (рис. 1, а и рис. 1, з).

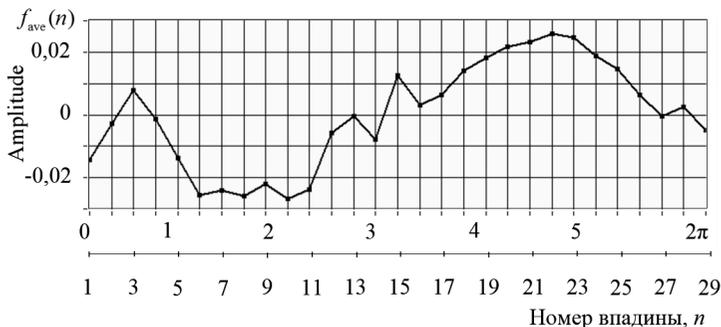


Рисунок 3 – Усредненный по времени сигнал левостороннего припуска $f_{ave}(n)$

Для каждой спектрограммы сформированы оценочные показатели:

$$\eta = \frac{A_1}{A_{ave}}, \quad (3)$$

где A_1 – амплитуда первой гармоники с периодом 2π ;

A_{ave} – средняя амплитуда гармоник, за исключением первой.

Причем

$$A_{ave} = \sum_{i=2}^{z/2} A_i, \quad (4)$$

где z – число впадин зубчатого колеса.

Величина верхнего предела суммирования $z/2$ обусловлена тем, что в соответствии с теоремой отсчетов В.А. Котельникова (Nyquist - Shannon sampling theorem) число дискретных точек в частотной области в 2 раза меньше числа дискретных точек во временной области. Получены следующие значения оценочных показателей для левой η^L и правой η^R сторон впадин (аналог известного отношения сигнал-шум или signal-to-noise ratio).

ЗК	1	2	3	ave
η^L	7,82	8,98	10	9,61
η^R	8,78	6,28	7,84	8,48

Ранее была выполнена оценка спектров припуска реальных зубчатых колес типа В1318В.41.004 (заводской код). Найдены реальные значения показателей для левой η^L и правой η^R стороны впадин. Разработан виртуальный прибор для выполнения быстрого преобразования Фурье (БПФ) сигнала припуска в среде LabVIEW 8.6. Разработана имитационная модель припуска, содержащая систематическую и случайную компоненту. В этой модели каждое зубчатое колесо с числом зубьев (или впадин) z рассматривается как реализация стохастического процесса, содержащая систематическую и случайную компоненты (одна из возможного ансамбля реализаций). Систематическая компонента сигнала припуска реализована гармонической синусоидальной функцией $y = \sin x$ (частота $f = 10$ Гц) с наложением на нее шумовой компоненты. Шумовая компонента представляет собой белый гауссовый шум, имеющий стандартное отклонение σ_{noise} . Эта имитационная модель позволяет создавать виртуальные зубчатые колеса (отдельные реализации сигнала припуска) с различной долей случайной компоненты в стохастическом двухкомпонентном сигнале. Эта доля регулируется с помощью стандартного отклонения σ_{noise} .

Имитационная модель создана с использованием виртуального прибора в программе LabVIEW 8.6 (рис. 4).

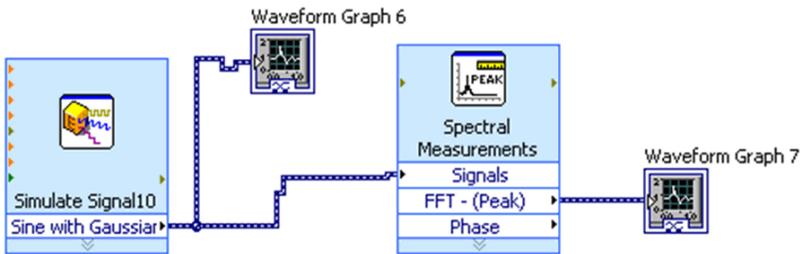


Рисунок 4 – Компьютерный виртуальный прибор для имитационного моделирования двухкомпонентного сигнала припуска

Выполнена настройка имитационной модели (рис. 4) в соответствии с полученными оценками спектров припуска 3-х реальных зубчатых колес. Исследовано влияние параметра настройки σ_{noise} виртуальной модели на величину η . Для этого разработан 3-х каналный виртуальный прибор (рис. 5), т.е. модель ансамбля возможных реализаций припуска (одна реализация припуска – односторонний припуск одного зубчатого колеса, ансамбль реализаций припуска соответствует партии зубчатых колёс).

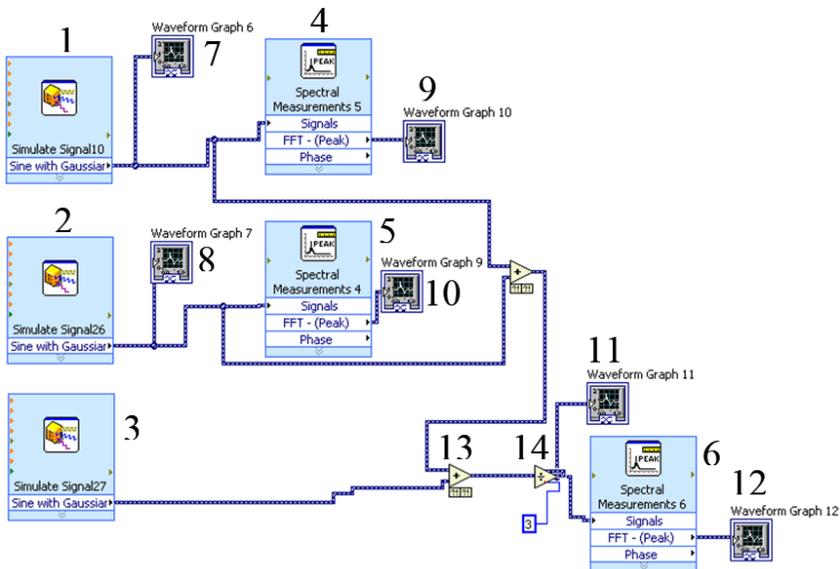


Рисунок 5 – 3-х каналный компьютерный виртуальный прибор для имитационного моделирования двухкомпонентного сигнала припуска

Для представления 3-х реализаций, в составе которых присутствуют синусоидальный сигнал и белый гауссовый шум в программе LabVIEW 8.6 работают с блоками Simulate Signal, которые вызываются палитрой Functions. На рис. 5 блоки (иконки) 1, 2 и 3 – это модели для первой, второй и третьей реализаций двухкомпонентного сигнала припуска. В узле сложения 13 (Add) складывают 3 реализации. Узел сложения вызывается через палитру Functions → Arithmetic and Comparison → Numeric (числовой). На выходе узла сложения 13 получают суммарную реализацию, которая поступает на вход узла деления Divide (узел 14 на рис. 5). На выходе узла 14 получают усредненную реализацию (делением суммарной реализации на число 3). Выходные сигналы блоков 1, 2 и узла 14 поступают на соответствующие блоки Spectral Measurements (блоки 4, 5), которые осуществляют процедуру быстрого преобразования Фурье (БПФ), преобразуя временное представление сигналов на интервале времени 0,1 с (29 отсчетов с частотой 290 Гц) в соответствующее частотное представление. Блоки 4, 5 и 6 вызываются через палитру Functions → Signal Analysis → Spectral Measurements. Причем на выходе блока 6 формируется спектр усредненной во времени реализации. Отдельные реализации во временной области и полученные результаты в виде спектрограмм выведены на лицевую панель виртуального прибора с помощью блоков индикации Waveform Graph (блоки 7, 8, 9, 10 на рис. 5). Усредненный временной сигнал припуска выведен на блок 11, а его спектр – на блок 12. Данные блоки (11 и 12) находятся в палитре Controls (Front Panel) → Graph Indicators.

Изменяя уровень σ_{noise} в указанном ниже диапазоне, получены оценочные параметры η_m при $m = 1, 2$ и 3.

m	1	2	3
σ_{noise}	0,1	0,5	1
η_m	16,99	7,45	4,098

Выбираем $\sigma_{noise} = 0,5$. Параметр η_m при $\sigma_{noise} = 0,5$ может при разных реализациях случайного процесса принимать значения 7,45...8,67, что соответствует реально измеренным 3-м зубчатым колесам.

Количество точек в реализации имитационной модели припуска соответствует числу зубьев реального зубчатого колеса, т.е. $z = 29$. Для сравнительной оценки принимаем амплитуду синусоидальной периодической компоненты $y = \sin x$ (частота $f = 10$ Гц) для реализаций одинаковую, например, единичную. В соответствии с выбранным уровнем $\sigma_{noise} = 0,5$ получены, например, три реализации аддитивной имитационной модели зубчатого колеса (рис. 6), соответствующие им амплитудные спектрограммы (рис. 7) и усредненный спектр (рис. 8).

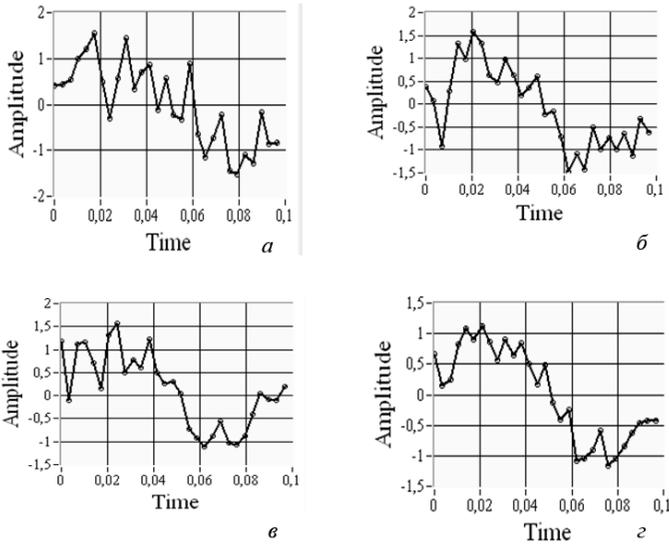


Рисунок 6 – Первая (*a*), вторая (*б*), третья (*в*) реализации имитационной двухкомпонентной модели припуска при $\sigma_{noise} = 0,5$ и средняя по времени реализация (*з*)

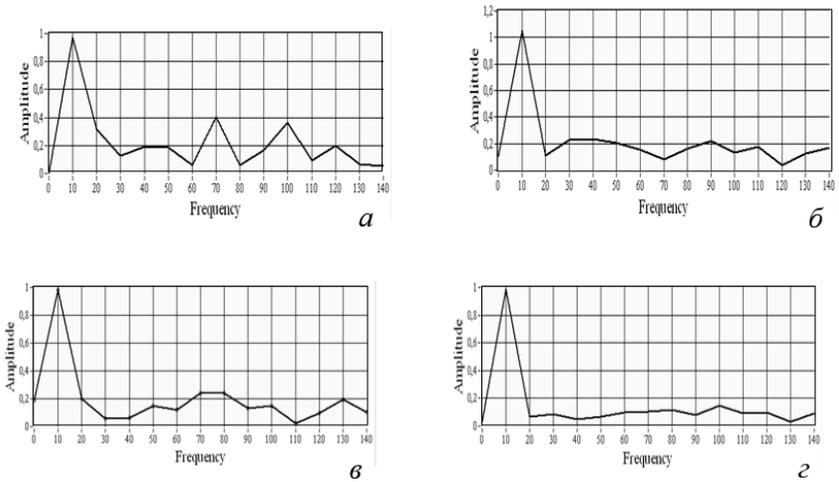


Рисунок 7 – Спектры 3-х временных реализаций (*a*, *б*, *в*) и спектр средней по времени реализации (*з*) для двухкомпонентной модели припуска при $\sigma_{noise} = 0,5$

Видно, что спектр реализации, являющейся средним по времени из предыдущих 3-х реализаций, имеет тенденцию к уменьшению амплитуд случайной составляющей сигнала припуска (рис. 7, *з*). Однако исчезновения спектра случайной составляющей при 3-х реализациях не происходит. Для более явного проявления этой тенденции необходимо увеличить число каналов усреднения, т.е. сделать это число больше 3-х. Это вызвано тем, что истинный случайный процесс можно реализовать путём увеличения числа реализаций (формирование среднего по множеству), истинный спектр появляется в пределе [8]. На практике это означает, что необходимо увеличить число исследуемых зубчатых колёс и соответственно добавить к усреднению по множеству больше исходных реализаций измеренных значений припуска. Для подтверждения тенденции на модели достаточно увеличить число каналов усреднения для виртуального прибора на рис. 5.

По аналогии с 3-х канальным виртуальным прибором на рис. 5, реализующим аддитивную модель припуска, разработан виртуальный прибор для большего количества моделируемых зубчатых колёс, например, 25-ти канальный (по аналогии с рис. 5, не показан). Теперь видно, что спектр усредненного по времени сигнала для 25 моделируемых зубчатых колёс имеет тенденцию к исчезновению (рис. 8, *б*). Это доказывает случайный характер компоненты x_γ в нормированном сигнале припуска

$z_{rated}^L(n) = x_\beta + x_\gamma$. Систематическая компонента x_β явно выражена на частоте 10 Гц (рис. 8) и не подвергается существенному изменению как в отдельных реализациях (рис. 7), так и для усредненного сигнала (рис. 8).

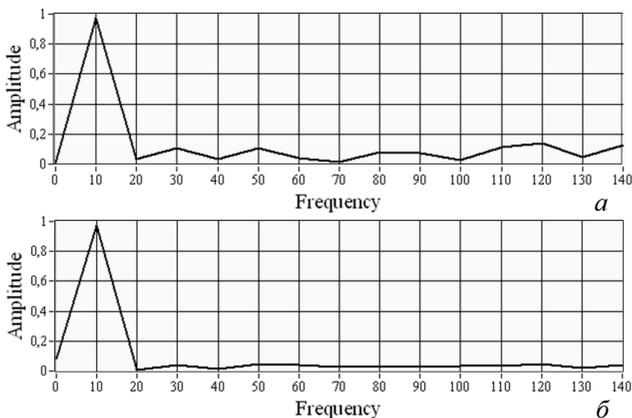


Рисунок 8 – Спектры реализаций, усредненных по времени, для 3-х (*а*) и 25-ти (*б*) реализаций

5. Выводы и перспективы развития

1. Спектр усредненной реализации для случайных гармонических составляющих имеет тенденцию к исчезновению, что соответствует свойству случайного стационарного эргодического процесса: при суммировании большого количества гармоник со случайными фазами среднее по множеству (равно среднему по времени) исчезает за счёт взаимной компенсации гармоник с противоположными знаками (или при фазовом сдвиге π). Это доказывает достоверность случайного процесса в имитационной модели припуска на зубошлифование.

2. Теоретико-вероятностный подход можно использовать для исследования реальных зубчатых колес, моделируя случайный процесс с помощью белого гауссового шума. Это позволяет изучать на имитационной модели припуск на зубошлифование с использованием различных способов его выравнивания, т.е. без использования дорогостоящих экспериментальных исследований реальных зубчатых колёс.

Список использованных источников: 1. Соколовский А.П. Расчёт точности обработки / А.П. Соколовский // Некоторые вопросы технологии машиностроения под ред. А.П. Соколовского. – М., Л.: Гос. науч.-техн. изд-во машиностр. лит-ры, 1948. – С.51-66. 2. Старков В.А. Физика и оптимизация резания материалов / В.А. Старков. – М.: Машиностроение, 2009. – 640 с. 3. Лищенко Н.В. Оптимизация профильного зубошлифования на станке с ЧПУ и системой измерения припуска / Н.В. Лищенко, В.П. Ларшин, В.В. Нежебовский // Високи технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. – Харків, НТУ “ХПІ”, 2016. – Вип. 1 (26). – С.50-61. 4. Ларшин В.П. Выравнивание припуска по профилю при наладке на зубошлифование методом копирования / В.П. Ларшин, Н.В. Лищенко // Современные тенденции в технологиях металлообработки и конструциях металлообрабатывающих машин и комплектующих изделий: материалы VI Всерос. межвуз. науч.-техн. конф. – Уфа: УГАТУ, 2016. – С.181-189. 5. Харкевич А.А. Борьба с помехами / А.А. Харкевич, изд. второе испр. – М.: Наука, 1965. – 275 с. 6. Цыпкин Я.З. Основы теории автоматических систем / Я.З. Цыпкин. – М.: Наука, 1977. – 560 с. 7. Гутников В.С. Фильтрация измерительных сигналов / В.С. Гутников. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1990. – 192 с. 8. Харкевич А.А. Линейные и нелинейные системы / А.А. Харкевич // Избранные труды в трёх томах. Том 2. – М.: Наука, 1973. – 566 с.

Bibliography (transliterated): 1. Sokolovskiy A.P. Raschet tochnosti obrabotki / Nekotorye voprosy tekhnologii mashinostroeniya pod red. A.P. Sokolovskogo. – M., L.: Gos. nauch.-tekhn. izd-vo mashinostr. lit-ry, 1948. – S.51-66. 2. Starkov V.A. Fizika i optimizatsiya rezaniya materialov. – M.: Mashinostroenie, 2009. – 640 s. 3. Lishchenko N.V., Larshin V.P., Nezhebovskiy V.V. Optimizatsiya profil'nogo zuboshlifovaniya na stanke s ChPU i sistemoy izmereniya pripuska. – Visoki tekhnologii v mashinobuduvanni: zb. nauk. prats'. – Kharkiv, NTU “KhPI”, 2016. – Vip. 1 (26). – S.50-61. 4. Larshin V.P., Lishchenko N.V. Vyravnivanie pripuska po profilyu pri naladke na zuboshlifovanie metodom kopirovaniya / // Sovremennyye tendentsii v tekhnologiyakh metalloobrabotki i konstruksiyakh metalloobrabatyvayushchikh mashin i komplektuyushchikh izdeliy: materialy VI Vseros. mezhvuz. nauch.-tekhn. konf. – Ufa: UGATU, 2016. – S.181-189. 5. Kharkevich A.A. Bor'ba s pomekhami, izd. vtoroe ispr. – M.: Nauka, 1965. – 275 s. 6. Tsyarkin Ya.Z. Osnovy teorii avtomaticheskikh sistem. – M.: Nauka, 1977. – 560 s. 7. Gutnikov V.S. Fil'tratsiya izmeritel'nykh signalov. – L.: Energoatomizdat. Leningr. otd-nie, 1990. – 192 s. 8. Kharkevich A.A. Lineynye i nelineynye sistemy / Izbrannyye trudy v trekh tomakh. Tom 2. – M.: Nauka, 1973. – 566 s.

С. С Некрасов, канд. техн. наук, А. Ю. Довгополов, Суми, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ РОЗ'ЄМНОГО РІЗЬБОВОГО З'ЄДНАННЯ З ВЕЛИКИМ КРОКОМ В ДЕТАЛЯХ З АРМОВАНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

З метою дослідження міцності, запропонованого роз'ємного з'єднання для деталей з армованих композиційних матеріалів(АКМ), були проведені дослідження зі зміною основних параметрів що найбільше впливають на працездатність з'єднання. Для запропонованого з'єднання, круглої різьби з великим кроком, змінювалися такі основні параметри як крок різьби p та глибина профілю різьби t . Отримані значення сили, дозволили встановити, що запропоноване роз'ємне з'єднання за характеристиками міцності, при всіх встановлених параметрах наближається, за показниками міцності, до з'єднання з аналогічними параметрами виконаному в металі. За рахунок виконання повного факторного експерименту за класичною схемою його виконання, були встановлені основні параметри при яких показники міцності будуть найкращими, для нашого випадку значення кроку різьби складатиме $p = 4$ мм, а значення глибини профілю різьби $t = 0.9$ мм.

Ключові слова: армовані композиційні матеріали(АКМ); роз'ємні різьбові з'єднання; напруження; міцність; кругла різьба

С целью исследования прочности, предложенного разъемного соединения для деталей из армированных композиционных материалов (АКМ), были проведенные исследования с изменением основных параметров, которые больше всего влияют на работоспособность соединения. Для предложенного соединения, круглой резьбы с большим шагом, изменялись такие параметры как шаг резьбы p и глубина профиля резьбы t . Полученные значения силы, позволили установить, что предложенное разъемное соединение по характеристикам прочности, при всех установленных параметрах приближается, по показателям прочности, к соединению, с аналогичными параметрами выполненному в металле. За счет выполнения полного факторного эксперимента по классической схеме его выполнения, были установлены основные параметры при которых показатели прочности будут наилучшими, для нашего случая шаг резьбы будет $p = 4$ мм, а значение глубины профиля резьбы $t = 0.9$ мм.

Ключевые слова: армированные композиционные материалы(АКМ) ; разъемные резьбовые соединения; напряжения; прочность; круглая резьба

With the purpose of research of durability, offered sectional connection for details from the reinforced composition materials (RCM), there were undertaken studies with the change of basic parameters that most influence on the capacity of connection. For the offered connection, round screw-thread with a stride, such parameters as step of screw-thread of p and depth of profile of screw-thread of t changed. Got values of force, allowed to set that sectional connection on descriptions of durability, at all set parameters approached, on the indexes of durability, to connection, with analogical parameters executed in a metal. Due to implementation of complete factor experiment on the classic chart of his implementation, basic parameters were set at that indexes of durability will be the best, for our case a step of screw-thread will be $p = 4$ mm, and value of depth of profile of screw-thread of $t = 1.76$ mm.

Keywords: CRM; detachable connections; voltages; strength; round screw-thread

Постановка проблеми: Останнім часом, питанням дослідження міцності конструкцій з композиційних матеріалів в Україні та в усьому світі,

приділяється досить значна увага. Найсвіжіші дослідження міцності різьбових з'єднань в армованих композиційних матеріалах провів Zemann Richard який досить детально встановив, міцність різьбового з'єднання виконаного у вуглепластиковому армованому композиті [3].

Завдяки своїм перевагам в вазі, та досить високим показникам міцності армовані композиційні матеріали такі як склопластик та вуглепластик досить часто використовуються в промисловості. Особливо зазначені матеріали використовуються у великій кількості для виготовлення, фюзеляжів літаків та космічних кораблів, а також в інших галузях промисловості таких як легке машинобудування та приладобудування. Також значне застосування знайшли дані армовані композиційні матеріали в модельному спорті.

Що ж стосується з'єднань представлених композитів то в основному використовуються не роз'ємні з'єднання деталей виготовлених з даних АКМ, такі як клейові та заклепкові, оскільки завдяки своїм анізотропним властивостям досить складно отримати роз'ємне з'єднання яке б задовольняло необхідним показникам міцності.

У випадку з різьбовими з'єднаннями даних АКМ, все набагато складніше, оскільки як було сказано вище, дані композити мають анізотропні властивості, то класичні різьби такі як метрична, дюймова не задовольняють показники міцності для даних з'єднань, оскільки завдяки наявності гострих концентраторів напруг, вони не витримують необхідного навантаження. Все це зв'язано з тим що зазначені, армовані композиційні матеріали не досить добре витримують навантаження на розтяг та стискання, порівняно з деякими металами, а на зсув взагалі погано себе зарекомендували [1]. Саме тому потрібна зовсім інша геометрія профілю роз'ємного з'єднання, щоб уникнути поганих показників міцності, та не допустити виникнення гострих концентраторів напруг в роз'ємному з'єднанні.

Метою даної роботи є дослідження міцності роз'ємного різьбового з'єднання з великим кроком в деталях з армованих композиційних матеріалів, та визначення основних параметрів при значеннях яких показники міцності будуть найбільшими.

Викладення основного матеріалу: Вирішити проблему отримання працездатного роз'ємного з'єднання для деталей виготовлених з АКМ, було запропоновано наступним чином, оскільки не допускається гострих концентраторів напруг, було вирішено виготовити круглу різьбу з великим кроком. Профіль даної різьби із зазначенням параметрів різьби представлений на рис. 1.

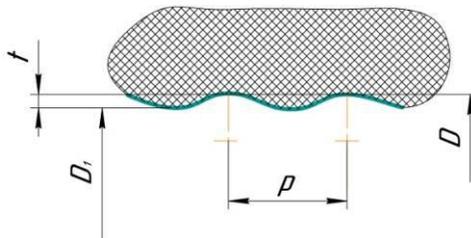


Рисунок 1 – Профіль запропонованої різьби із зазначенням параметрів

Для практичної перевірки міцності запропонованого роз’ємного з’єднання були виготовлені металеві вставки з круглою різьбою, в даних вставках змінювалися основні параметри круглої різьби це p – крок різьби, та t – глибина профілю різьби. Параметри даних різьб та межі їх варіювання представлені в табл. 1.

Таблиця 1 – Параметри що змінювалися в ході експерименту

Параметри що змінювалися	Позначення	Межі варіювання
Глибина профілю різьби	t	0.5 – 1.0
Крок різьби	p	1.0 – 4.0

Зазначені металеві вставки виготовлялися раніше відомим способом [2], з конструкційної сталі, марка сталі «Сталь 45» ескіз даної вставки представлений на рис. 2а, а фото вставки на рис. 2б. Перед нарізанням різьби металеві вставки оброблялися на токарному верстаті до діаметру 6.2мм. потім відбувалося нарізування самої різьби.

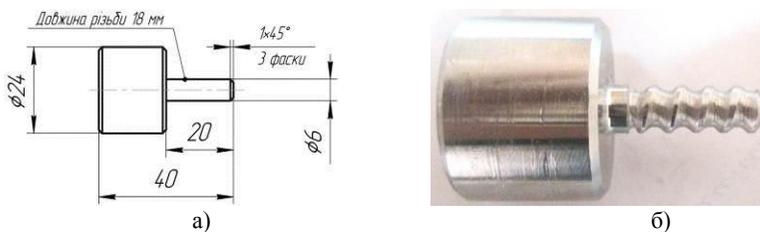
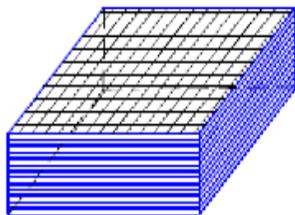


Рисунок 2 – Металева вставка круглої зовнішньої різьби:
а – ескіз металевої вставки; б – фото вставки

Внутрішня кругла різьба була виготовлена в склопластиковій пластині армованій в двох взаємно перпендикулярних напрямках схема армування представлена на рисунку 3а, а фото самої пластини на рис. 3б.

Матеріал з якого було виготовлено зазначену пластину це склотканина(розміри решітки 0.5 – 0.5 мм) товщина 0.2 мм та епоксидна смола EPOXY-520, розміри платини 190x107x16 мм. Технологія обробки круглої внутрішньої різьби в АКМ детально описана в [1].



а)



б)

Рисунок 3 – Склопластикова пластина:
а – схема армування пластини; б – фото пластини

Далі відбувалося виконання повного факторного експерименту за класичною схемою його виконання. В нашому випадку побудова матриці повного факторного експерименту була реалізована на двох рівнях по двом факторах. Таким чином була реалізована матриця типу 2^2 . В табл. 2 представлено кодування факторів які в нашому випадку змінювалися.

Таблиця 2 – Кодування факторів

Фактори що змінюються:	Позначення	Межі варіювання	Кодове позначення	Нижній рівень	Верхній рівень	Нульовий рівень
Глибина профілю різьби	t	0.5 – 1.0	x_1	0.5	1.0	0.75
Крок різьби	p	1.0 – 4.0	x_2	1.0	4.0	3.0

Умова яка обов’язково повинна виконуватися в процесі реалізації зазначеного експерименту

$$0.5 \leq x_1 \leq 1.0$$

$$1.0 \leq x_2 \leq 4.0$$

Матриця планування експерименту типу 2^2 , представлена в табл. 3.

Таблица 3 – Матрица планування експерименту типу 2²

№ експерименту	x ₁	x ₂	t	p
1	+	+	1	4
2	+	-	1	1
3	-	+	0.5	4
4	-	-	0.5	1
5	0	0	0.75	2.5

Далі виготовлялися круглі різьби із зазначеними параметрами, для кожного випадку виконувалось по 5 різьб.

Далі проводилося випробування даного різьбового з'єднання на міцність використовувалася універсальна розривна машина Р20. Фото експерименту представлено на рис. 4.

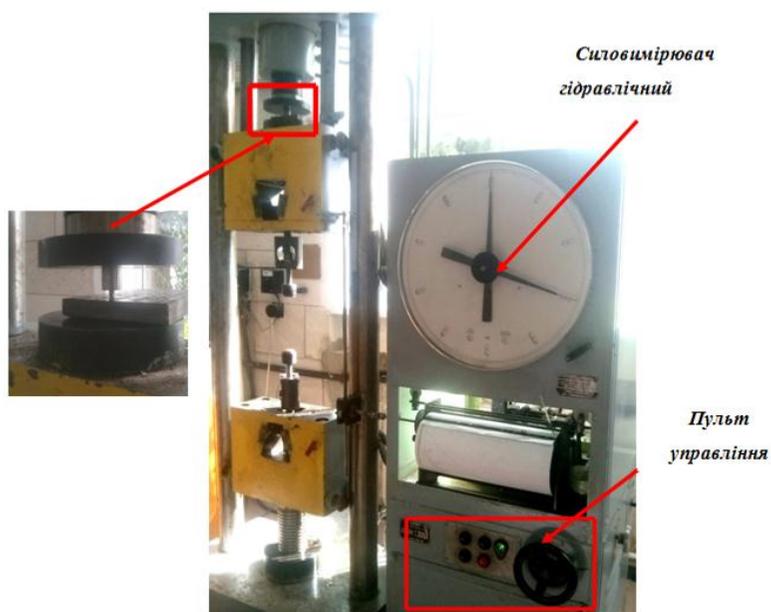


Рисунок 4 – Фото експерименту з дослідження міцності різьбового з'єднання

На основі проведених досліджень були отримані значення сили для кожного випадку ці значення та середнє значення сили зведені в табл. 4.

Таблиця 4 – Значення сили отримані для кожного випадку в процесі експерименту

№	F ₁ кН	F ₂ кН	F ₃ кН	F ₄ кН	F ₅ кН	F _{ср} кН
1	14.4	14	13.5	13.5	13.7	13.82
2	13	12	11.7	12	13	12.34
3	9.2	9	11	10.4	10.2	9.96
4	12.2	12.5	12.6	12.2	8	11.5
5	15	14.6	13	12.4	13.7	13.74

Розраховуємо коефіцієнти рівняння регресії, для нашого випадку. Рівняння регресії матиме наступний вигляд:

$$y = F = b_0 + b_1 \cdot t + b_2 \cdot p + b_{12} \cdot t \cdot p + b_3 \cdot t^2 \quad (1)$$

Визначення коефіцієнтів рівняння 1 виконано методом найменших квадратів шляхом мінімізації функціоналу:

$$\Phi = \sum_{u=1}^n (F(b_0, b_1, b_2, b_{12}, b_3)) \rightarrow \min \quad (2)$$

Розв'язавши рівняння 2 отримаємо залежність для F, та значення коефіцієнтів для нашого випадку вони будуть наступними: $b_0 = -2.49$, $b_1 = 43.68$, $b_2 = -1.52$, $b_{12} = 2.0$, $b_3 = -29.34$.

Згідно отриманих нами значень отримуємо рівняння для перевірки адекватності моделі, для нашого випадку рівняння матиме наступний вигляд:

$$y = F = -2.49 + 43.68 \cdot t - 1.52 \cdot p + 2.0 \cdot t \cdot p - 29.34 \cdot t^2 \quad (3)$$

Перевірка адекватності лінійної моделі виконується за допомогою критерію Фішера. Критерій Фішера приймає значення при $s_{ao}^2 = 6.2 \cdot 10^{-7}$,

$$F = \frac{6.2 \cdot 10^{-7}}{0.145} = 4.29 \cdot 10^{-6} \leq 6.6079$$

модель є адекватною.

Похибка отриманих значень для визначення допустимої сили для даного з'єднання сягає менше 1%.

Знайшовши екстремуми отриманої нами функції, знаходимо значення наших параметрів при яких показники міцності будуть найвищими. У нашому випадку для нашої функції значення кроку різьби складатиме $p = 4 \text{ мм}$, а значення глибини профілю різьби $t = 0.9 \text{ мм}$.

Висновки. У результаті проведеного дослідження, з визначення характеристик міцності для запропонованого роз'ємного різьбового з'єднання з великим кроком, було встановлено що запропоноване з'єднання виконане в АКМ за показниками міцності наближається до аналогічних роз'ємних з'єднань виконаних в металах. На основі експериментальних даних, та за рахунок виконання повного факторного експерименту за класичною схемою його виконання, були отримані значення основних параметрів при яких показники міцності будуть найбільшими а саме значення кроку різьби складатиме $p = 4 \text{ мм}$, а значення глибини профілю різьби $t = 0.9 \text{ мм}$. На основі проведеного дослідження міцності, можна зробити висновок, що запропоноване різьбове з'єднання з великим кроком, найкраще підходить для армованих композиційних матеріалів. Дане твердження було підтверджено дослідним шляхом.

Список використаних джерел: 1. Довгополов А. Ю. Технологія обробки гвинтової поверхні роз'ємного з'єднання в деталях з армованих композиційних матеріалів / А. Ю. Довгополов, С. С. Некрасов // Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ" : зб. наук. пр. Сер. : Нові рішення в сучасних технологіях = Bulletin of National Technical University "KhPI" : coll. of sci. papers. Ser. : New solutions in modern technologies. – Харків : НТУ "ХПІ", 2016. – № 42 (1214). – С. 38-42. 2. Пат. UA 115892. Спосіб обробки круглої зовнішньої різьби/ Некрасов С.С., Довгополов А. Ю. МПК B23C 3/32 (2006.01), B23B 1/00. - No u201612668 заявл. 12.12.2016; 25.04.2017, бюл. No 8. 3. Richard Zemann Manufacturing of threads direct into a carbon fibre reinforced polymer / Zemann Richard // Vienna University of Technology (TU Wien), Institute for Production Engineering and Laser Technology, Landstraßer Hauptstraße 152, 1030 Vienna, AUSTRIA.

Bibliography (transliterated): 1. Dovgoplov A. Ju., Nekrasov S. S. Tehnologija obrobki gvintovoi poverhni roz'emnogo z'ednannja v detaljah z armovanih kompozicijnih materialiv / Visnik Nac. tehn. un-tu "HPI" : zb. nauk. pr. Ser. : Novi rishennja v suchasnih tehnologijah – Bulletin of National Technical University "KhPI" : coll. of sci. papers. Ser. : New solutions in modern technologies. – Harkiv: NTU "HPI", 2016. – № 42 (1214). – S. 38-42. 2. Pat.UA 115892. Sposib obrobki krugloї zovnishn'oi riz'bi/ Nekrasov S.S., Dovgoplov A. Ju. MPK B23C 3/32 (2006.01), B23B 1/00. – No u201612668 zajavl. 12.12.2016; 25.04.2017, bjul. No 8. 3. Richard Zemann Manufacturing of threads direct into a carbon fibre reinforced polymer / Vienna University of Technology (TU Wien), Institute for Production Engineering and Laser Technology, Landstraßer Hauptstraße 152, 1030 Vienna, AUSTRIA.

УДК 621.9

Ф.В. Новиков, д-р техн. наук, Ю.Г. Гуцаленко, В.И. Полянский, В.В. Ивкин
Харьков, Украина

МЕХАНИКА И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ С УЧЕТОМ ИЗНОСА ЗЕРЕН КРУГА

Роботу присвячено теоретичному аналізу механіки процесу алмазного шліфування з урахуванням зносу зерен круга для науково обґрунтованого вибору оптимальних умов обробки. Наведено і обговорені аналітичні залежності для визначення продуктивності обробки, які отримані на основі реалізації теоретико-імовірнісного підходу до кінематико-геометричного моделювання шліфування з урахуванням фізики зносу ріжучих зерен круга. Дано деякі практичні рекомендації.

Ключові слова: алмазний круг, ріжучий рельєф, механіка шліфування, товщина зрізу, знос зерна, продуктивність обробки

Работа посвящена теоретическому анализу механики процесса алмазного шлифования с учетом износа зерен круга для научно обоснованного выбора оптимальных условий обработки. Приведены и обсуждены аналитические зависимости для определения производительности обработки, полученные на основе реализации теоретико-вероятностного подхода к кинематико-геометрическому моделированию шлифования с учетом физики износа режущих зерен круга. Даны некоторые практические рекомендации.

Ключевые слова: алмазный круг, режущий рельеф, механика шлифования, толщина среза, износ зерна, производительность обработки

The work is devoted to the theoretical analysis of the mechanics of the diamond grinding process, taking into account the wear of the wheel grains for scientifically based choice of optimal processing conditions. The analytical dependences for definition of processing productivity are presented and discussed on the basis of the probability-theoretic approach to the kinematic-geometric modeling of grinding, taking into account the physics of wear of the wheel cutting grains. Some practical recommendations are given.

Keywords: diamond wheel, cutting relief, grinding mechanics, slice thickness, grain wear, processing productivity

Введение. Процесс шлифования характеризуется значительными технологическими возможностями с точки зрения обеспечения качества и точности обрабатываемых поверхностей. В особой мере это относится к алмазному шлифованию, которое, благодаря высокой твердости и остроте режущих кромок круга, позволяет производить эффективную обработку материалов повышенной твердости (твердых сплавов, керамических материалов, высокопрочных сталей и сплавов и т. д.), причем на операциях как окончательной, так и предварительной обработки при съеме значительных припусков [1-3]. При этом в процессе шлифования в связи с износом зерен и связки происходит изменение параметров режущего рельефа алмазного круга.

Для каждого режима шлифования, обрабатываемого материала и характеристики круга существует вполне конкретный режущий рельеф круга, определяемый уровнем энергетического равновесия системы “круг – деталь”. Достижение высоких показателей шлифования обеспечивается в основном поддержанием в процессе обработки оптимального установившегося режущего рельефа [4] эксплуатацией кругов в режиме самозатачивания, а при использовании в кругах прочных металлических связок – в режиме автономной или зонально совмещенной с резанием электрохимической или электроэрозионной правки [5].

В связи с этим в настоящей работе рассматриваются вопросы аналитической платформы теоретического изучения механики процесса алмазного шлифования с учетом износа зерен круга и научно обоснованного выбора оптимальных условий производительной обработки.

Механика шлифования с износом зерен круга. Анализ закономерностей формирования режущего рельефа алмазного круга в процессе шлифования проведен на основе расчетной схемы, в которой скорость износа связки равна скорости износа зерен. Для расчетов на рабочей поверхности круга выделен слой зерен dn , имеющих высоту выступания над связкой $(b - y_s)$ (рис. 1 [4]), и рассмотрено образование профиля от их наложения на сечение образца, совпадающее с диаметральной плоскостью круга. При взаимном горизонтальном движении dn зерен и радиальном движении образца на его сечении образуются срезы различной толщины, подчиняющиеся равномерному закону распределения. Относительная полнота профиля элементарного среза от dn зерен принимает вид:

$$\varepsilon_i(y) = \frac{dn[a_s + 2tgy \cdot (y - y_i)]}{B}, \quad (1)$$

где a_s – величина площадки износа на зерне, м; $dn = n \cdot \frac{1}{b} dy_i$.

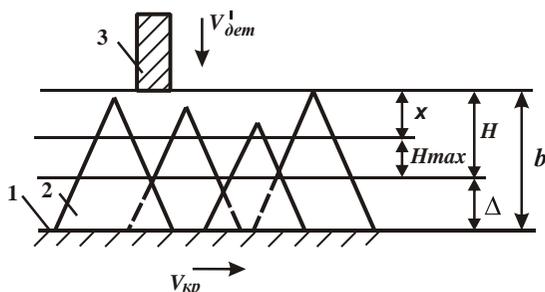


Рисунок 1 – Расчетная схема параметров процесса шлифования:
1 – уровень связки; 2 – режущее зерно; 3 – обрабатываемый образец

Суммарный профиль от таких срезов можно получить вероятностным суммированием, для чего следует перейти от вероятностной функции $\varepsilon_i(y)$ к противоположной функции $\Phi_i(y) = 1 - \varepsilon_i(y)$ и воспользоваться теоремой умножения независимых случайных величин, интегрируя выражение $[a_s + 2tg\gamma \cdot (y - y_a)]$ в пределах от y_a до y :

$$\Phi(y) = \prod_{i=1}^{\infty} \Phi_i(y) = e^{-\frac{dn}{B} [a_s \cdot (y - y_a) + tg\gamma (y - y_a)^2]}, \quad (2)$$

где y_a – координата площадки износа на зерне.

Относительную полноту профиля от всех зерен, участвующих в резании, можно получить умножением вероятностной функции $\Phi(y)$ для всех элементарных слоев зерен, представляя величину a_s выражением $a_s = 2tg\gamma(y_a - y_s)$ и заменяя множитель $(y_a - y_s)$ на $\eta \cdot (y_a - y_s)$, где $\eta = 0 \dots 1$ – безразмерный коэффициент, определяющий величину линейного износа зерна до его объемного разрушения. После несложных преобразований, имеем

$$\Phi_{\text{общ}} = e^{-\frac{n \cdot tg\gamma \cdot (1 - \eta^2) \cdot y^3}{b \cdot B \cdot 3}}. \quad (3)$$

Для алмазного шлифовального круга, введенного в обработку полной шириной B (м) с поверхностной концентрацией зерен k (шт./м²), общее число зерен n (шт.), участвующих в резании со скоростью круга $V_{кр}$ (м/с) при движении образца в слое зерен высотой b (м) со скоростью $V'_{\text{дем}}$ (м/с) по нормали к нему, равно

$$n = k \cdot B \cdot V_{кр} \cdot \frac{b}{V'_{\text{дем}}}. \quad (4)$$

Максимальная глубина внедрения образца в рабочую поверхность круга, при которой на его сечении образуется полный профиль, т. е. происходит полный сьем металла, определяется из условия $\varepsilon(H) = 0,95$:

$$H = \sqrt[3]{\frac{9 \cdot b \cdot V'_{\text{дем}}}{tg\gamma \cdot k \cdot V_{кр} \cdot (1 - \eta^2)}}. \quad (5)$$

Или, с вводом

$$H_0 = \sqrt[3]{\frac{9 \cdot b \cdot V'_{\text{дем}}}{tg\gamma \cdot k \cdot V_{кр}}}, \quad (6)$$

$$H = \frac{H_0}{\sqrt[3]{1-\eta^2}} \quad (7)$$

Как видно, безразмерный коэффициент η зависит от отношения x/H_0 : чем оно больше, тем больше η (рис. 2). Так, при $x/H_0 < 0,8$ безразмерный коэффициент η принимает значения, близкие x/H_0 , а при $x/H_0 > 0,8$ – значения, близкие к единице ($\eta \rightarrow 1$). С увеличением отношения x/H_0 значения η приближаются к единице асимптотически. Как следует из рис. 2, условию $x = H_0$ соответствует значение $\eta = 0,75$. Задавая значение H_0 (например, $H_0 = 1$ мкм), из рис. 2 можно установить взаимосвязь между величинами x и η . Исходя из зависимости (5), несложно определить параметр H . Для $H_0 = 1$ мкм в табл. 1 приведены расчетные значения параметра H .

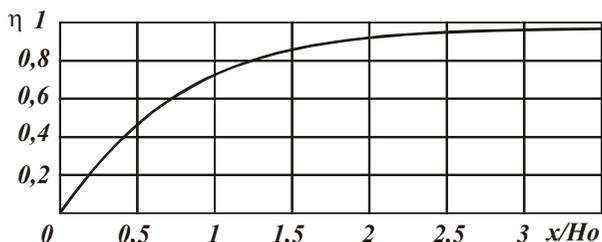


Рисунок 2 – Зависимость величины коэффициента η от отношения x/H_0

Таблица 1 – Расчетные значения параметра H

x , мкм	0	0,25	0,55	0,99	1,55	2,05	3,7	∞
H , мкм	–	1,0	1,1	1,32	1,72	2,16	3,74	∞

С увеличением величины линейного износа зерна x (при $H_0 = 1$ мкм), параметр H увеличивается. Причем, начиная с $x = 2$ мкм, значения параметров x и H примерно равны в связи с ростом износа зерна и, соответственно, асимптотическим приближением безразмерной величины η к единице ($\eta \rightarrow 1$). Зная значения параметров x и H , исходя из зависимости $H_{max} = H - x$ (рис. 2 и табл. 1), несложно определить параметр H_{max} .

Как следует из рис. 3, с увеличением x параметр H_{max} уменьшается. При $x \rightarrow \infty$ справедливо условие $H_{max} \rightarrow 0$. Учитывая ограниченность величины x , параметр H_{max} принимает конечные значения.

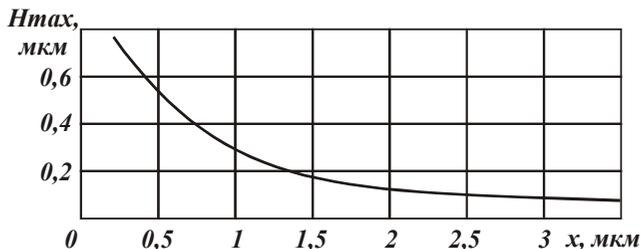


Рисунок 3 – Зависимость максимальной вероятностной (приведенной) толщины среза H_{max} от величины линейного износа зерна круга x

Таким образом показано, что величина x оказывает на максимальную толщину среза H_{max} значительное влияние, изменяя его практически в неограниченных пределах. Это указывает на то, что при расчете параметра H_{max} , наряду с традиционными параметрами (режимами шлифования и характеристиками круга), необходимо учитывать величину линейного износа зерен x . В общем виде параметр H_{max} определяется:

$$H_{max} = (1 - \eta) \cdot H = H_0 \cdot \sqrt[3]{\frac{(1 - \eta)^2}{(1 + \eta)}}. \quad (8)$$

Параметры H_{max} и H_0 связаны линейной зависимостью, а H_{max} и η – нелинейной зависимостью. Параметр H_{max} тем больше, чем больше H_0 и меньше безразмерный коэффициент η . Исходя из зависимости (8), множитель $\sqrt[3]{(1 - \eta)^2 / (1 + \eta)}$ можно рассматривать в качестве поправочного коэффициента, зависящего от степени затупления режущих зерен. В табл. 2 приведены расчетные значения параметра H_{max} в зависимости от безразмерного коэффициента η для $H_0 = 1$ мкм.

Таблица 2 – Расчетные значения параметра H_{max}

η	0	0,25	0,5	0,75	0,9	0,95	0,99	1,0
H_{max}	–	0,75	0,55	0,33	0,17	0,11	0,04	0

Как видно, с увеличением безразмерного коэффициента η параметр H_{max} уменьшается. При $\eta \rightarrow 1$ справедливо условие $H_{max} \rightarrow 0$. С одной стороны, по мере износа зерен параметр H_{max} уменьшается, что позволяет улучшить чистоту обработки. С другой стороны, это ведет к прекращению съема материала, так как с уменьшением безразмерного коэффициента $\eta \rightarrow 0$ параметр $H_{max} \rightarrow 0$. В табл. 2 параметр H_{max} равен множителю $\sqrt[3]{(1-\eta)^2/(1+\eta)}$, поскольку $H_0 = 1$ мкм. Таким образом, множитель $\sqrt[3]{(1-\eta)^2/(1+\eta)}$, выполняющий роль поправочного коэффициента в зависимости (8), с увеличением безразмерного коэффициента η уменьшается вплоть до нуля. Это указывает на то, что износ зерен, определяемый величинами x и η , оказывает существенное влияние на закономерности процесса шлифования.

При определении безразмерного коэффициента η следует исходить из условия, что линейный износ круга происходит в результате объемного разрушения зерен, которому обязательно предшествует их поверхностное разрушение [6]. Выпадение зерен из связки первоначально в расчетах не рассматривается. Предельная (разрушающая) нагрузка принимается пропорциональной площади среза $S_{пред}$, которая зависит от $H_{max} = (1-\eta) \cdot H$ и безразмерного коэффициента η (рис. 1):

$$S_{пред} = tg \gamma \cdot H^2 \cdot (1-\eta^2). \quad (9)$$

Разрешая зависимости (5) и (9), имеем

$$\eta = \sqrt{1 - \frac{k^2 \cdot V_{кр}^2 \cdot S_{пред}^3}{81 \cdot tg \gamma \cdot b^2 \cdot V_{дем}'^2}}. \quad (10)$$

Как следует из зависимости (10), с увеличением $V_{дем}'$ безразмерный коэффициент η увеличивается и стабилизация режущего рельефа круга происходит на большем удалении от вершины исходного максимально выступающего зерна. Следовательно, прежде чем зерно объемно разрушится, оно претерпевает значительный износ от истирания и микроскальвания кромок. Радиусы округления при вершинах таких зерен увеличиваются, а режущий рельеф круга становится более сглаженным. Полученный результат обусловлен тем, что с увеличением $V_{дем}'$ предельная площадь среза, соответствующая разрушающей нагрузке, расположена на большем удалении от вершины исходного (неизношенного) зерна. Положение нижней границы

этой предельной площади среза, определенное выше (5), подстановкой (10) определится также следующим образом:

$$H = \frac{9 \cdot b \cdot V'_{\text{дем}}}{k \cdot V_{\text{кр}} \cdot S_{\text{пред}}} . \quad (11)$$

Тогда линейный износ зерна x и максимальная толщина среза H_{max} определяются следующими зависимостями:

$$x = \eta \cdot H = \sqrt{1 - \frac{k^2 \cdot V_{\text{кр}}^2 \cdot S_{\text{пред}}^3}{81 \cdot \text{tg} \gamma \cdot b^2 \cdot V_{\text{дем}}'^2}} \cdot \frac{9 \cdot b \cdot V'_{\text{дем}}}{k \cdot V_{\text{кр}} \cdot S_{\text{пред}}} ; \quad (12)$$

$$H_{\text{max}} = (1 - \eta) \cdot H = \left[\left(1 - \sqrt{1 - \frac{k^2 \cdot V_{\text{кр}}^2 \cdot S_{\text{пред}}^3}{81 \cdot \text{tg} \gamma \cdot b^2 \cdot V_{\text{дем}}'^2}} \right) \cdot \frac{9 \cdot b \cdot V'_{\text{дем}}}{k \cdot V_{\text{кр}} \cdot S_{\text{пред}}} \right] . \quad (13)$$

Анализ зависимостей (10), (12) и (13) показывает, что при некотором естественно положительном износе режущих зерен в процессе шлифования ($0 < \eta < 1$), например, в интерпретации выступающей над связкой части зерен конусообразными с прямым углом 2γ при вершине ($\text{tg} \gamma = 1$), стабилизация рельефа круга возможна при условии:

$$V'_{\text{дем}} > \frac{k \cdot V_{\text{кр}} \cdot S_{\text{пред}}^{3/2}}{9b} . \quad (14)$$

Иначе нагрузки, действующие на зерна, не достигают предельных значений, и разрушение зерен не происходит. Зерна подвергаются, в основном, истиранию и микроскальванию с образованием площадок износа, вызывая повышенную силовую и тепловую напряженность процесса шлифования и затушение круга. Такая закономерность износа круга имеет место при неправильном выборе характеристики круга, особенно на финишных операциях, когда зерна прочно удерживаются в связке и обновления режущего рельефа новыми кромками не происходит. Полученное решение полностью подтверждается практическими рекомендациями по шлифованию, согласно которым на «мягких» режимах резания эффективно применять круги с пониженной прочностью зерен и связки, обеспечивая режим самозатачивания круга и исключая образование значительных площадок износа на зернах.

Из (10) следует также, что стремление к повышению производительности шлифования регулированием (повышением) только скорости детали и, соответственно, $V'_{\text{дем}}$, может приводить к превышению потенциальных возможностей системы физико-геометрических (k , $S_{\text{пред}}$, b) и

кинематического ($V_{кр}$) определителей состоятельности режущего рельефа круга для выполнения расчетного условия постановки исследуемой модели шлифования $\varepsilon(y) = 0,95$ и, соответственно, осуществления полного съема подводимого в зону резания металла. Не снятый металл в виде гребешков микронеровностей начнет интенсивно контактировать со связкой, разрушая ее, оголяя зерна и уменьшая таким образом прочность удержания их в связке. Критических нагружений сжатия и объемного разрушения зерен в таких условиях, как правило, не происходит из-за преждевременного выпадания зерен из связки (обычно доминирующий вид износа), которому предшествует также изнашивание истиранием и поверхностным микроскалыванием кромок в микрорежущих контактах.

Проведенное обсуждение вокруг условия стабильного шлифования для определяемого скоростью подачи заготовки в зону резания кинематического параметра $V'_{дет}$ (макроуровень функционирования технической системы алмазно-абразивной обработки) дополним ниже рассмотрением некоторых существеннейших с нашей точки зрения оснований физики микромира высокопроизводительного шлифования.

Производительность шлифования и стойкость круга. Принимаем, что рассматриваемые объемное разрушение зерна или его выпадение из связки без разрушения (в зависимости от прочности удержания зерна в связке) происходят от действия некоторых сил резания, имеющих радиальную (P_{y1} , Н) и тангенциальную (P_{z1} , Н) составляющие. Исходя из известного физического определения толщины среза $S_{пред}$ с использованием условного напряжения резания (σ , Н/м²) [7]:

$$S_{пред} = P_{z1} / \sigma, \quad (15)$$

или, с использованием коэффициента шлифования $k_{ш}$,

$$k_{ш} = P_{z1} / P_{y1}, \quad (16)$$

имеем:

$$S_{пред} = k_{ш} \cdot P_{y1} / \sigma. \quad (17)$$

С учетом (9) по расчетной схеме рис. 1 и известной связи [4]

$$\sigma = 2\sigma_{сж} / k_{ш}, \quad (18)$$

где $\sigma_{сж}$ – предел прочности на сжатие обрабатываемого материала, Н/м²; из (17) относительно $k_{ш}$ получаем:

$$k_{ш} = (2tg\gamma \cdot (1-\eta)^2 \cdot H^2 \cdot \sigma_{сж} / P_{y1})^{1/2}. \quad (19)$$

Воспользуемся также известной зависимостью [8]:

$$k_{и} = \sqrt{\frac{4 \cdot \sigma_{сюз}}{\pi \cdot tg \gamma \cdot HV}} \cdot (1 - \eta), \quad (20)$$

где HV – твердость обрабатываемого материала (по Виккерсу), Н/м².

Разрешая систему (19) и (20) относительно H , для состоявшегося внедрения зерна в обрабатываемый материал H ($\eta \rightarrow 1$), отсчитываемого от условной вершины неизношенного зерна (рис. 1), получаем:

$$H = \sqrt{\frac{P_{y1}}{\pi \cdot tg^2 \gamma \cdot HV}}. \quad (21)$$

Как следует из зависимости (21), чем больше твердость обрабатываемого материала HV и меньше сила P_{y1} , тем меньше глубина внедрения зерна H . Следовательно, при шлифовании труднообрабатываемых материалов глубина H будет небольшой.

Тогда для некоторой характеристики состояния алмазного порошка в связующей матрице рабочей части шлифовального круга, включающей объемную концентрацию (m , безразмерная величина) и зернистость (\bar{X} , м), коэффициент

$$(1 - \varepsilon) = H / \bar{X}, \quad (22)$$

определяющий степень выступания зерна над уровнем связки алмазного круга и изменяющийся в пределах 0 ... 1, при условии равенства глубины внедрения зерна в обрабатываемый материал H максимальной высоте выступания вершин зерен над уровнем связки круга b , $b=H$, также будет небольшим. Однако из этого не следует уменьшение производительности обработки Q (м³/с), определяемой зависимостью [4], полученной на основе теоретико-вероятностного подхода при шлифовании с учетом площади S (м²) поперечного сечения обрабатываемой прямолинейной детали (пластины), движущейся с постоянной скоростью $V'_{дем}$ по нормали к рабочей поверхности алмазного круга (рис. 1):

$$Q = (m \cdot tg \gamma \cdot (1 - \varepsilon)^3 \cdot (1 - \eta)^2 \cdot S \cdot V'_{дем}) / 600\pi. \quad (23)$$

Это связано с одновременным уменьшению максимальной высоты выступания вершин зерен над уровнем связки круга с $b = H + \Delta$ (рис. 1) до $b \approx H$ соответственным уменьшением и безразмерного коэффициент η , как это следует из разрешения (5) относительно η при $H = b$:

$$\eta = \sqrt{1 - \frac{9 \cdot V'_{дем}}{tg \gamma \cdot k \cdot V_{кр} \cdot b^2}}, \quad (24)$$

Согласно (23), уменьшение η позволяет несколько компенсировать снижение производительности обработки Q с уменьшением безразмерного коэффициента $(1 - \varepsilon)$.

Известно и теоретически обосновано [4], что основным условием повышения производительности обработки Q при шлифовании материалов высокой твердости является поддержание на алмазном круге "острого" режущего рельефа ($\eta \rightarrow 0$). Это достигается работой алмазного круга в режиме самозатачивания путем применения относительно малопрочных органических или керамических связей, или работой алмазного круга на прочных металлических связках в режиме его непрерывной правки автономно зоне резания или непосредственно в ней электрохимическим (например, опыт [9]) или электроэрозионным (например, опыт [10]) путем.

Известно, что с увеличением зернистости \bar{X} алмазного круга прочность зерна на раздавливание (определяемая разрушающей нагрузкой P_1 , Н) увеличивается по эмпирической зависимости

$$P_1 = \alpha \cdot \bar{X}^\beta, \quad (25)$$

где α и $\beta < 1$ – постоянные [4]. Тогда коэффициент $(1 - \varepsilon)$ (22) с учетом зависимости (21) определится как:

$$(1 - \varepsilon) = \frac{1}{\bar{X}^{(1-0,5\beta)}} \cdot \sqrt{\frac{\alpha}{\pi \cdot \text{tg}^2 \gamma \cdot HV}}. \quad (26)$$

Из (26) следует, что коэффициент $(1 - \varepsilon)$ тем больше, чем меньше зернистость круга \bar{X} и больше параметр α , который определяет относительную прочность зерен различных марок алмазов. Следовательно, добиться повышения производительности обработки Q при обработке материалов более высокой твердости, согласно зависимости (23), можно за счет применения мелкозернистых алмазных кругов с повышенной прочностью алмазных зерен. С учетом того, что параметры \bar{X} и HV входят в зависимость (26) примерно с одинаковой степенью, при этом зернистость алмазного круга следует изменять (понижать) обратно пропорционально изменению (повышению) твердости обрабатываемого материала.

Уменьшение зернистости круга \bar{X} , согласно зависимости (26), приводит к увеличению коэффициента $(1 - \varepsilon)$, т. е. повышению степени выступления зерна над уровнем связки круга и уменьшению части зерна, расположенной в связке круга. Поэтому прочность удержания зерна уменьшится, и для ее увеличения необходимо использовать более прочные металлические связки алмазного круга.

Стойкость алмазных кругов определяется диапазоном изменения безразмерного коэффициента η . Чем больше значения η в пределах физического существования в режущем контакте ($0 < \eta < 1$), тем выше

стойкость круга. Задача увеличения значения η связана с увеличением параметра H , согласно зависимости (5), и коэффициента $(1-\varepsilon)$ – согласно зависимости (22). Следовательно, увеличить стойкость алмазного круга можно за счет увеличения высоты выступания зерен над уровнем связки, применения более прочных металлических связок и методов с попутным обработке целевым вскрытием алмазного слоя круга, например, электроэрозионной правки.

В общем случае для более правильного представления о технологических возможностях алмазного шлифования параметр b следует рассматривать в виде суммы двух слагаемых (рис. 1): $b = H + \Delta$, где Δ – высота межзеренного пространства круга, занимаемая стружками и другими продуктами обработки; в принятой [4, 11] систематике: $\Delta = \xi \cdot \Delta_0$; ξ – коэффициент, учитывающий степень заполнения стружкой межзеренного пространства круга ($\xi > 1$); Δ_0 – толщина условного слоя "расплавленного" обрабатываемого материала, который образуется за одно вращение круга, м.

Для круглого продольного шлифования с глубиной t (м) справедливы соотношения [4]:

$$A_0 = \frac{S_{\text{мгн}}}{B} = \frac{Q}{V_{\text{кр}} \cdot B} = \frac{B \cdot V_{\text{дем}} \cdot t}{V_{\text{кр}} \cdot B} = \frac{V_{\text{дем}} \cdot t}{V_{\text{кр}}} \quad (27)$$

где $S_{\text{мгн}} = Q/V_{\text{кр}}$ – мгновенная суммарная площадь среза всеми одновременно работающими зернами круга, м²; $V_{\text{дем}}$ – окружная скорость заготовки, м/с.

Из совместного рассмотрения расчетной схемы по рис. 1, (22) и (23) очевидно, что чем меньше параметр Δ , тем больше резерв повышения H и, соответственно, производительности обработки Q при шлифовании. Следовательно, в идеале необходимо стремиться к выполнению двух условий: $\xi \rightarrow 1$; $b \approx H$.

По данным проведенных теоретических исследований [4, 11] для обычного алмазного шлифования твердосплавных деталей коэффициент ξ изменяется от 100 до 1 000 и более. Поэтому его уменьшение, например в 10 раз, позволит во столько же раз повысить производительность обработки. При алмазном шлифовании различных сталей, титановых сплавов и других относительно пластичных материалов, коэффициент ξ еще больше, и эффект обработки от уменьшения ξ для таких материалов может быть еще выше. Добиться существенного уменьшения коэффициента ξ можно путем применения различных методов вибрационного и ультразвукового дробления стружки, повышающих компактность ее размещения на рабочей поверхности алмазного круга.

Значительно большими технологическими возможностями в ряду других комбинированных методов шлифования, обеспечивающих растворение,

оплавление или сгорание стружки в зоне резания, располагает алмазное электроэрозионное шлифование [4], или алмазно-искровое шлифование в терминологической практике университета-разработчика [12]. При оптимальных условиях алмазного электроэрозионного шлифования коэффициент ζ можно уменьшить до $\zeta \approx 1$ и превратить режущий рельеф алмазного круга в полностью активно работающий, у которого полный сьем (срез) подводимого в зону резания обрабатываемого металла производится на уровне связки круга.

Таким образом, при правильном назначении механических и электрических режимов алмазного электроэрозионного шлифования, благодаря управляющему воздействию энергии электрических разрядов на связку алмазного круга и стружку, обеспечивается развитый режущий рельеф и высокая стойкость алмазного круга при максимальной реализации его потенциальных возможностей.

С учетом сказанного, важно провести анализ круглого наружного алмазного шлифования для условий: $\zeta \rightarrow 1$; $b \approx H$, которые можно реализовать благодаря методологии алмазного электроэрозионного шлифования в математической интерпретации [4] и ее адаптации к реальной практике [10, 11]. Из практических соображений трансформируем зависимости для H , η , Q вводом в них режимных параметров V_{dem} и t в явном виде через эквивалентную замену [13]:

$$V'_{dem} = V_{dem} \cdot \sqrt{2t \cdot \rho} , \quad (28)$$

где $\rho = 1/R_{кр} + 1/R_{dem}$; $R_{кр}$, R_{dem} – радиусы круга и детали, м.
С использованием (28) и (9) из (11) получаем:

$$H = \sqrt[3]{\frac{9b \cdot V_{dem} \cdot \sqrt{2t \cdot \rho}}{tg \gamma \cdot k \cdot V_{кр} \cdot (1 - \eta^2)}} ; \quad (29)$$

С использованием (28) из (24) получаем:

$$\eta = \sqrt{1 - \frac{9 \cdot V_{dem} \cdot \sqrt{2t \cdot \rho}}{tg \gamma \cdot k \cdot V_{кр} \cdot b^2}} ; \quad (30)$$

Чисто режимное описание расчетной производительности в идеально жесткой технической системе круглого наружного шлифования,

$$Q = S_0 \cdot V_{dem} \cdot t, \quad (31)$$

где S_0 – продольная подача заготовки, м/об., с позиций углубленного анализа в контексте рассматриваемой модели процесса дополним здесь выражением с представлением t в (31) из (30); получаем:

$$Q = \frac{S_0 \cdot \operatorname{tg}^2 \gamma \cdot k^2 \cdot b^4 \cdot V_{кр}^2 \cdot (1 - \eta^2)^2}{162 \cdot V_{дем} \cdot \rho}. \quad (32)$$

Как следует из (32), добиться увеличения производительности обработки Q можно путем уменьшения безразмерного коэффициента η в соответствии с зависимостью (30), реализуя режим самозатачивания алмазного круга на органической или керамической связках, или режим электроэрозионной правки алмазного круга на металлической связке. Очевидно, подход с выбором оптимальной связки, обеспечивающей работу алмазного круга в режиме самозатачивания с выполнением условия $b \approx H$, более универсален.

Важным условием повышения производительности при шлифовании труднообрабатываемых материалов следует также рассматривать поддержание необходимого уровня η одновременным уменьшением скорости детали $V_{дем}$ и превосходящим это уменьшение увеличением продольной подачи S_0 , что с очевидностью прослеживается по зависимости, полученной подстановкой выражения t из (31) в (30):

$$\eta = \sqrt{1 - \frac{9 \cdot \sqrt{2 \cdot V_{дем} \cdot Q \cdot \rho}}{\operatorname{tg} \gamma \cdot k \cdot V_{кр} \cdot b^2 \cdot \sqrt{S_0}}}. \quad (33)$$

Естественной верхней границей максимального использования возможностей по подаче на оборот S_0 для получения производительных преимуществ в условиях небольших скоростей заготовки является ширина алмазосодержащей рабочей ленты на периферии шлифовального круга. С учетом этого разработан высокопроизводительный процесс продольного круглого наружного алмазного шлифования быстрорежущих и твердосплавных многолезвийных инструментов (фрез, разверток, зенкеров и т. д.) [14]. В отличие от существующих процессов шлифования, где продольная подача на оборот заготовки S_0 не превышает $0,1B$, а скорость вращения заготовки $V_{дем}$ составляет $20 \dots 30$ м/мин, осуществлять шлифование предложено со съемом припуска до $1,2$ мм на сторону за один проход, $S_0 = 0,9B$ и $V_{дем} = 1,5$ м/мин, что позволило при экономически приемлемых затратах на расход алмазного материала в $1,5 \dots 2$ раза повысить производительность обработки Q .

Эффективность применения этого технологического решения алмазного шлифования изделий из высокотвердых труднообрабатываемых материалов стала возможной благодаря специально разработанным принципам назначения параметров режима резания [11], согласно которым для любого рельефа круга независимо от зернистости и концентрации алмазных зерен существует допустимая (прочностная) толщина среза максимально выступающим зерном H_{max} , при достижении которой удельный расход алмаза принимает минимальное значение, и поэтому поиск оптимальных режимов

шлифования следует производить из условия обеспечения полного съема металла на уровне достижения H_{max} , расчетно-экспериментальное выявление которой предопределяет успех оптимизации.

Из рисунка 1, принимая во внимание $\eta = x/H$ и используя (29), определяя t из (31), в первом приближении исходя также из $(1-\eta) \approx 1$ и тем более $(1-\eta^2) \approx 1$ при весьма малых η для поддерживаемого острым режущего рельефа, получаем математическую зависимость для определения H_{max} в задачах практического технологического анализа

$$H_{max} = \sqrt[3]{\frac{9 \cdot b}{tg \gamma \cdot k \cdot V_{кр}}} \cdot \sqrt[6]{\frac{2 \cdot \rho \cdot V_{дет} \cdot Q}{B}}, \quad (34)$$

Как это показано выше, получение производительных преимуществ в шлифовании материалов высокой твердости, характеризующемся небольшим значением максимальной высоты выступания вершин зерен над уровнем связки алмазного круга b , уменьшением скорости детали $V_{дет}$ и увеличением S_0 до $S_0 \approx B$ при сохранении значения η , предполагает также существенное увеличение глубины шлифования t . Очевидно, что наибольший эффект в реализации ресурса повышения производительности операций шлифования увеличением его глубины достигается при условии $t = R_{дет}$. Реализовать это условие можно при прорезке глубоких пазов, шлифовании глубоких канавок, разрезке материалов отрезными кругами, а также при плоском шлифовании торцовым кругом с вращающимся столом станка, рассматривая в качестве ширины шлифования параметр $t = R_{дет}$, а в качестве глубины шлифования – параметр S_0 , которые входят в зависимость (31).

Следует также заметить, что указанное выше необходимое условие стабилизации выходных показателей шлифования (14), вкупе с оговоренной там же необходимой умеренностью в соблюдении заключенного этим условием превышения определяющей производительность обработки скорости подачи заготовки в зону резания $V'_{дет}$ над числовой характеристикой параметрического комплекса с параметрами k , $V_{кр}$, $S_{пред}$ в числителе и b – в знаменателе, в интересах реализации процессов повышенной устойчивой производительности стимулирует применение алмазных кругов из сверхтвердых зерен повышенной концентрации (повышая k) и, особенно, прочности в связках с повышенным алмазоудержанием (повышая $S_{пред}$), разработку высокоскоростных техники и технологий (повышая $V_{кр}$), а также совершенствование очистки зоны резания от продуктов обработки в направлении интенсификации эвакуации из нее его твердых продуктов, тем самым позволяя минимизировать параметр Δ и, соответственно, b . Как известно, компетентная реализация метода алмазно-искрового шлифования превосходно способствует этому [10].

В реальной практике и совершенствовании моделей шлифования важно также учитывать, что изменение скоростей $V'_{дет}$ и $V_{кр}$, особенно значительное повышение, существенно изменяет теплофизические и динамические условия шлифовального контакта, что влияет на физико-механические свойства и поведение связки инструмента и алмазных зерен, физико-механическую картину срезов последними и их изнашивания. Поэтому пропорциональное увеличению $V_{кр}$ увеличение $V'_{дет}$ без учета обратных связей на возможности по $S_{пред}$ и b в общем случае отнюдь не гарантирует сохранение того же по условию (14) уровня возможности реализации стабилизированного шлифования, в том числе по η и H_{max} .

Закключение. Рассмотрение вероятностной кинематико-геометрической модели установившегося режущего рельефа круга с учетом физики износа его режущих зерен применительно к механике шлифования позволило получить аналитические взаимосвязи параметров влияния на износ режущих зерен и максимальную толщину среза.

Приведены аналитические зависимости для определения основных параметров и производительности шлифования в результате действия на режущие зерна предельных нагрузок, вызывающих их объемное разрушение и последующее выпадение из связки круга. Показано, что добиться увеличения производительности обработки можно главным образом за счет уменьшения величины линейного износа зерен до момента их объемного разрушения. Это достигается работой круга в режиме интенсивного самозатачивания или с применением эффективных методов правки.

Полученные теоретические результаты повышают уровень взаимного соответствия теории и практики шлифования, апробированы в разработках и применениях устойчивых процессов высокопроизводительной алмазно-абразивной обработки, в особенности с электрофизической стимуляцией процессов в зоне резания.

Практика реализаций результатов выполненного теоретического исследования развивает опыт разработки техники, инструмента и технологий алмазно-искрового шлифования в харьковской научной школе физики процессов резания и свидетельствует о перспективности дальнейших исследований в этом направлении.

Результаты выполненных исследований позволяют осуществлять теоретический анализ механики процесса алмазного шлифования с учетом износа зерен круга для научно обоснованного выбора оптимальных условий обработки и рекомендуются к использованию на машиностроительных предприятиях при проектировании и реализации высокопроизводительных технологических процессов шлифования, в особенности изделий из труднообрабатываемых материалов с применением алмазных кругов на металлических связках.

- Список использованных источников:** 1. *Захаренко, И. П.* Основы алмазной обработки твердосплавного инструмента / *И. П. Захаренко.* – Киев : Наук. думка, 1981. – 300 с. 2. Инструменты из сверхтвердых материалов : [Справочник] / Под. ред. *Н. В. Новикова* и *С. А. Клименко.* – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 2014. – 608 с. 3. *Лавриненко, В. И.* Инструменты из сверхтвердых материалов в технологиях абразивной и физико-технической обработки : монография / *В. И. Лавриненко, В. Ю. Солод.* – Каменское : ДГТУ, 2016. – 529 с. 4. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. *Ф. В. Новикова* и *А. В. Якимова.* В 10-ти т. Т. 1 : Механика резания материалов. – Одесса : ОНПУ, 2002. – 580 с. 5. *Грabcенко, А. И.* Інтегровані процеси обробки матеріалів різанням : підручник / *А. І. Грabcенко, В. О. Залого, Ю. М. Внуков* і др.; під заг. ред. *А. І. Грabcенка* і *В. О. Залого.* – Суми : Університетська книга, 2017. – 451 с. – Рос. мовою. 6. *Мишинаевский, Л. Л.* Износ шлифовальных кругов / *Л. Л. Мишинаевский.* – Киев : Наук. думка, 1982. – 192 с. 7. *Маслов, Е. Н.* Основные закономерности высокопроизводительного шлифования / *Е. Н. Маслов.* – В кн. : Высокопроизводительное шлифование. – М. : Изд-во АН СССР, 1962. – С. 3-17. 8. *Якимов, О. В.* Высокопродуктивне шліфування : навч. посібник / *О. В. Якимов, Ф. В. Новиков, Г. В. Новиков, О. О. Якимов.* – Київ : ІСДО, 1995. – 180 с. 9. *Грabcенко, А. И.* Расширение технологических возможностей алмазного шлифования / *А. И. Грabcенко.* – Харьков : Вища шк. Изд-во при Харьк. ун-те, 1985. – 184 с. 10. *Гуцаленко, Ю. Г.* Алмазно-искровое шлифования материалов высокой функциональности : монография [Электронный ресурс] / *Ю. Г. Гуцаленко.* – 2-е вид., перераб. и допов. – Х. : Вид-во «Курсор», НТУ «ХП», 2017. – 289 с. [3,37 Мб] – Рос. мовою. – <http://web.kpi.kharkov.ua/cutting/wp-content/uploads/sites/143/2017/12/dsghfm-monograph-ed.2.pdf>. 11. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. *Ф. В. Новикова* и *А. В. Якимова.* В 10-ти т. Т. 9 : Проектирование технологических процессов в машиностроении. – Одесса : ОНПУ, 2005. – 584 с. 12. *Гуцаленко, Ю. Г.* Алмазно-искровое шлифование: обзор сорокалетия разработки харьковской научной школы физики процессов резания / *Гуцаленко, Ю. Г.* // Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве: Тр. 18-й междунар. науч.-практ. конф., 5-6 дек. 2012 г. – Харьков : ГП ХМЗ «ФЭД», 2012. – С. 79-88. 13. *Якимов, А. В.* Теоретические основы резания и шлифования материалов : учеб. пособие / *А. В. Якимов, Ф. В. Новиков, Г. В. Новиков* и др. – Одесса : ОГПУ, 1999. – 450 с. 14. *Новиков, Ф. В.* Оптимальные решения в металлообработке : монография / *Ф. В. Новиков, В. А. Жовтobрюх, Г. В. Новиков.* – Днепр : Лира, 2017. – 476 с.

Bibliography (transliterated): 1. Zaharenko, I. P. Osnovyalmaznoj obrabotki tverdosplavnogo instrumenta. Kiev, Naukova dumka, 1981, 300 p. Print. 2. Instrumenty iz sverhtvyordykh materialov. Ed. by N. V. Novikov and S. A. Klimenko. Moscow: Mashinostroenie, 2014, 608 p. Print. 3. Lavrinenko, V. I., and V. Yu. Solod. Instrumenty iz sverhtvyordykh materialov v tekhnologiyah abrazivnoy i fiziko-tekhnicheskoy obrabotki. Kamenskoe, DGTU, 2016, 529 p. Print. 4. Fiziko-matematicheskaya teoriya processov obrabotki materialov i tekhnologii mashinostroeniya. Ed. by F. V. Novikov and A. V. Yakimov. In 10 vols. Vol. 1: Mekhanika rezaniya materialov. Odessa, ONPU, 2002, 580 p. Print. 5. Grabchenko, A. I., et al. Integrovani procesi obrobki materialiv rizannvam. Ed. by A. I. Grabchenko and V. O. Zaloga. Sumi, Universitetska kniga, 2017, 451 p., in Russian. Print. 6. Mishnaevskij, L. L. Iznos shlifoval'nyh krugov. Kiev, Naukova dumka, 1982, 192 p. Print. 7. Maslov, E. N. "Osnovnye zakonomernosti vysokoproizvoditel'nogo shlifovaniya". In book: Vysokoproizvoditel'noe shlifovanie. Moscow, Academy of Sciences of the USSR, 1962, 3-17. Print. 8. Yakimov, O. V., et al. Visokoproduktivne shlifuvannya. Kiiv, ISDO, 1995, 180 p. Print. 9. Grabchenko, A. I. Rasshirenie tekhnologicheskikh vozmozhnostejalmaznogo shlifovaniya. Kharkov, Vishcha shkola, 1985, 184 p. Print. 10. Gutsalenko, Yu. G. Almazno-iskrove shlifuvannya materialiv visokoї funkcional'nosti. Kharkov, Kursor, NTU «KhPI», 2017, Web, 289 p., 3.37 Mb, in Russian, <<http://web.kpi.kharkov.ua/cutting/wp-content/uploads/sites/143/2017/12/dsghfm-monograph-ed.2.pdf>>. 11. Fiziko-matematicheskaya teoriya processov obrabotki materialov i tekhnologii mashinostroeniya. Ed. by F. V. Novikov and A. V. Yakimov. In 10 vols. Vol. 9: Proektirovanie tekhnologicheskikh processov v mashinostroenii. Odessa, ONPU, 2005, 584 p. Print. 12. Gutsalenko, Yu. G. "Almazno-iskrovoe shlifovanie: obzor sorokaletija razrabotki har'kovskoj nauchnoj shkoly fiziki processov rezaniya". Fizicheskie i komp'juternye tekhnologii v narodnom hozyajstve: Tr. 18-j mezhdunar. nauch.-prakt. konf. 5th-6th Dec. 2012. Kharkov, GP HMZ "FED", 2012, 79-88. Print. 13. Yakimov, A. V., et al. Teoreticheskie osnovy rezaniya i shlifovaniya materialov. Odessa, OSPU, 1999, 450 p. Print. 14. Novikov, F. V., V. A. Zhvotobryuh, and G. V. Novikov. Optimal'nye resheniya v metalloobrabotke. Dnepr, Lira, 2017, 476 p. Print.

УДК 621.9

Ф.В. Новиков, д-р техн. наук, Ю.Г. Гуцаленко, Харьков, Украина,
К.Г. Янку, д-р техн. наук, Тыргу-Жиу, Румыния,
О.С. Кленов, канд. техн. наук, Харьков, Украина

ВЛИЯНИЕ МАКРО- И МИКРОМЕХАНИКИ РЕЗАНИЯ НА ТЕПЛОНАПРЯЖЕННОСТЬ ПРОЦЕССА ШЛИФОВАНИЯ

Розглядається концепція розробки нових технологічних рішень високопродуктивного шліфування зі значним збільшенням продуктивності обробки при незначному збільшенні термомеханічної напруженості процесу різання. Реалізація концепції впливає з можливостей істотного зменшення умовної напруги різання і, відповідно, енергосмістості обробки, що узгоджується з практичними даними.

Ключові слова: процес шліфування, теплонапруженість, температура різання, продуктивність обробки, умовне напруження різання, енергосмістість обробки

Рассматривается концепция разработки новых технологических решений высокопроизводительного шлифования со значительным увеличением производительности обработки при незначительном увеличении термомеханической напряженности процесса резания. Реализация концепции следует из возможностей существенного уменьшения условного напряжения резания и, соответственно, энергоемкости обработки, что согласуется с практическими данными.

Ключевые слова: процесс шлифования, теплонапряженность, температура резания, производительность обработки, условное напряжение резания, энергоемкость обработки

A concept for the development of new technological solutions of the high-performance grinding with a significant increase in processing productivity under a slight increase in thermomechanical tension of the cutting process is considered. The implementation of the concept follows from the possibilities of a significant reduction in the conditional cutting stress and, correspondingly, the energy intensity of the treatment, which is consistent with practical data.

Keywords: grinding process, heat stress, cutting temperature, processing productivity, conditional cutting stress, treatment energy intensity

Введение. Как известно, процесс шлифования характеризуется высокой теплонапряженностью, что приводит к снижению качества обработки – появлению на обрабатываемых поверхностях прижогов, микротрещин и других температурных дефектов. Для уменьшения теплонапряженности процесса применяют шлифовальные круги с высокой режущей способностью, способные эффективно снизить интенсивность трения в зоне резания технологические среды и т.д. [1-4]. Вместе с тем, добиться необходимого уменьшения теплонапряженности процесса шлифования и соответственно температуры резания удастся не всегда. Поэтому важно знать связанные с термомеханикой процесса шлифования закономерности, что требует разработки математической модели формирования температуры резания при шлифовании с учетом распределения тепла, уходящего в обрабатываемую деталь и образующиеся стружки [5]. Такой теоретический

подход, в отличие от известных, основанных, как правило, на экспериментальном установлении этого распределения, позволит более объективно оценить технологические возможности уменьшения температуры резания при шлифовании и разработать рекомендации по их практической реализации.

Аналитические исследования. В расчетной схеме (рис. 1) снимаемый припуск с обрабатываемой детали представлен в виде бесконечного множества адиабатических стержней длиной l_1+l_2 и площадью поперечного сечения S , расположенных по нормали к обрабатываемой поверхности [1, 5, 6].

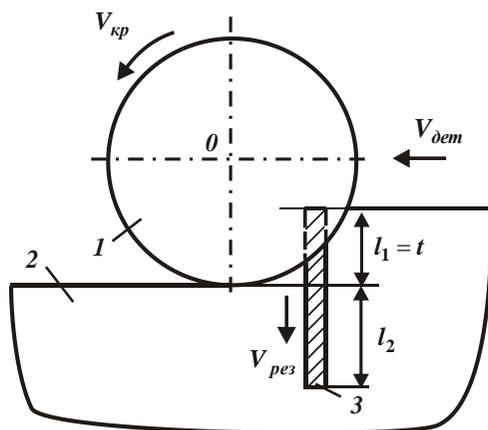


Рисунок 1 – Расчетная схема температуры резания при плоском глубинном шлифовании:
1 – круг; 2 – деталь; 3 – адиабатический стержень

При глубинном шлифовании необходимо учитывать перерезание шлифовальным кругом части адиабатического стержня (длиной $l_1=t$) со скоростью

$$V_{рез} = V_{дет} \cdot \sqrt{\frac{t}{D_{кр}}}, \quad (1)$$

где $V_{дет}$ – скорость детали, м/с; t – глубина шлифования, м; $D_{кр}$ – диаметр круга, м; l_2 – глубина проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали, м [7–9].

Это эквивалентно перемещению теплового источника по нормали к обрабатываемой поверхности (т. е. вдоль адиабатического стержня) со скоростью $V_{рез}$.

Количество тепла Q_1 , затрачиваемое на нагревание адиабатического стержня длиной l_1+l_2 , равно

$$Q_1 = c \cdot \rho \cdot S \cdot t \cdot \theta + 0,5 \cdot c \cdot \rho \cdot S \cdot l_2 \cdot \theta, \quad (2)$$

где c – удельная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/(кг·К); ρ – плотность обрабатываемого материала, кг/м³; коэффициент 0,5 учитывает неравномерность нагрева нижней части адиабатического стержня по длине l_2 .

Количество тепла Q_2 , затрачиваемое на нагревание части адиабатического стержня длиной l_2 вследствие теплопроводности обрабатываемого материала:

$$Q_2 = \lambda \cdot S \cdot \frac{\theta}{l_2} \cdot \tau_2, \quad (3)$$

где λ – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, Вт/м·К; τ_2 – время действия теплового источника при нагревании части адиабатического стержня длиной l_2 , с.

Количество тепла Q_2 также выражается зависимостью $Q_2 = q \cdot S \cdot \tau_2$. Тогда, разрешая зависимость (3) относительно длины l_2 , имеем:

$$l_2 = \frac{\lambda \cdot \theta}{q}, \quad (4)$$

где $q = \frac{P_z \cdot V_{кр}}{F} = \frac{\sigma \cdot Q}{B \cdot \sqrt{t \cdot D_{кр}}}$ – плотность теплового потока, Вт/м²;

$P_z = \sigma \cdot \frac{Q}{V_{кр}}$ – тангенциальная составляющая силы резания, Н; σ – условное

напряжение резания (энергоёмкость обработки), Н/м²; $Q = B \cdot V_{дем} \cdot t$ – производительность обработки, м³/с; $V_{рез}$ – скорость круга, м/с; $F = B \cdot \sqrt{t \cdot D_{кр}}$ – площадь контакта шлифовального круга с обрабатываемым материалом, м²; B – ширина шлифования, м; $D_{кр}$ – диаметр круга, м.

Принимая $Q_1 = q \cdot S \cdot \tau_1$ и подставляя зависимость (4) в (2), получено квадратное уравнение относительно температуры резания при шлифовании θ :

$$\theta^2 + \frac{2 \cdot q \cdot t}{\lambda} \cdot \theta - \frac{2 \cdot q^2 \cdot \tau_1}{\lambda \cdot c \cdot \rho} = 0, \quad (5)$$

где $\tau_1 = t / V_{рез}$ – время контакта шлифовального круга с адиабатическим стержнем, равное времени его перерезания шлифовальным кругом, с.

Решение квадратного уравнения (5) с учетом выражения $q = \frac{\sigma \cdot Q}{B \cdot \sqrt{t \cdot D_{кр}}}$

и $Q = B \cdot V_{дем} \cdot t = \text{const}$ принимает вид:

$$\theta = \frac{\sigma}{c \cdot \rho} \cdot \frac{2}{\sqrt{1 + \frac{2 \cdot B \cdot \lambda \cdot \sqrt{D_{кр}}}{c \cdot \rho \cdot Q \cdot t^{0,5}} + 1}} \quad (6)$$

В работе [10] установлено, что при шлифовании σ описывается аналитической зависимостью:

$$\sigma = \frac{\sigma_{сж}}{\text{tg} \left[45^\circ - \frac{(\psi + \gamma)}{2} \right]}, \quad (7)$$

где $\sigma_{сж}$ – предел прочности на сжатие обрабатываемого материала, Н/м²;
 ψ – условный угол трения режущего зерна с обрабатываемым материалом;
 γ – отрицательный передний угол режущего зерна.

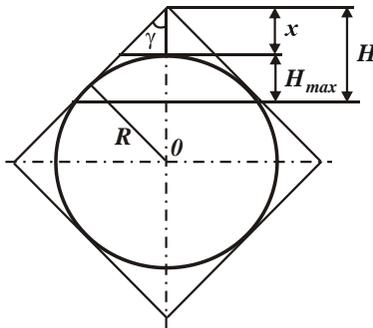


Рисунок 2 – Расчетная схема параметров микромеханики шлифования для конусообразной модели зерна

В анализе условного напряжения резания (энергоемкости обработки) σ и отношения $\sigma/\sigma_{сж}$ при алмазном шлифовании следует исходить из максимальной вероятностной (приведенной) толщины среза H_{max} , которая для формы зерна, показанной на рис. 2, определяется зависимостью [11]:

$$H_{max} = \sqrt[3]{\frac{630 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{дем} \cdot \sqrt{t \cdot \rho} \cdot (1 - \eta)^2}{\text{tg} \gamma \cdot m \cdot V_{кр} \cdot (1 + \eta)}} \quad (8)$$

где \bar{X} – зернистость круга, м; m – объемная концентрация зерен в круге; $V_{кр}$ – скорость круга, м/с; $\rho = 1/R_{кр} + 1/R_{дет}$, $R_{кр}$, $R_{дет}$ – радиусы круга и детали, м; $\eta = x/H$ – безразмерный коэффициент затупления зерна (для острозаточенного зерна $\eta = 0$, для затупленного зерна $\eta \rightarrow 1$); x – величина линейного износа зерна, м; H – максимальная условная глубина внедрения зерна в обрабатываемый материал, отсчитывается от вершины исходного неизношенного максимально выступающего над уровнем связки зерна, м.

Если рассматривать режущее зерно сферой радиусом R , рис. 3, то η в зависимости (8) следует выразить через R .

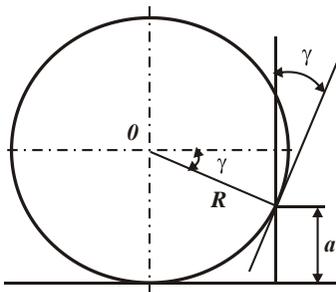


Рисунок 3 – Расчетная схема параметров процесса микрорезания единичным зерном в его сферическом представлении

Для $\gamma = 45^\circ$, с учетом $H = x/\eta$ и $H = x + H_{max}$, имеем:

$$\eta = 1/(1+2,415H_{max}/R). \quad (9)$$

Для упрощения расчетов и удобства использования зависимости (7), она может быть преобразована к виду [12]:

$$\sigma = \frac{\sigma_{сж}}{\left(\sqrt{\frac{a}{2 \cdot R}} - \operatorname{tg} \frac{\psi}{2} \right)}, \quad (10)$$

где a – толщина среза, рис. 3 ($a = H_{max}$ в расчетной схеме по рис. 2), м.

В табл. 1 приведены расчетные значения отношения $\sigma/\sigma_{сж}$, полученные на основе использования зависимости (9), с увеличением отношения a/R .

Таблица 1 – Расчетные значения отношения $\sigma/\sigma_{сж}$

a/R	0	0,1	0,2	0,3	0,5
$\sigma/\sigma_{сж}$ для $\psi = 0$	∞	4,54	3,125	2,56	2,0
$\sigma/\sigma_{сж}$ для $\psi = 10^0$	–	7,35	4,37	3,33	2,42
$\sigma/\sigma_{сж}$ для $\psi = 20^0$	–	22,73	6,94	4,67	3,09

С учетом зависимости (9) отношение $\frac{(1-\eta)^2}{(1+\eta)}$, входящее в зависимость (8), принимает вид:

$$\frac{(1-\eta)^2}{(1+\eta)} = \frac{5,83 \cdot \left(\frac{H_{max}}{R}\right)^2}{\left(1 + 2,415 \cdot \frac{H_{max}}{R}\right) \cdot \left(2 + 2,415 \cdot \frac{H_{max}}{R}\right)}. \quad (11)$$

Поскольку отношение $(H_{max}/R) < 1$, то зависимость (11) можно упростить:

$$\frac{(1-\eta)^2}{(1+\eta)} = 2,915 \cdot \left(\frac{H_{max}}{R}\right)^2. \quad (12)$$

Подставляя (12) в (8) и преобразуя относительно H_{max} , получаем:

$$H_{max} = \frac{1836,45 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{dem} \cdot \sqrt{t \cdot \rho}}{m \cdot V_{кр} \cdot R^2}. \quad (13)$$

В отличие от аналогичной зависимости (8), полученной [11] для конусообразной формы зерна, его сферическое моделирование позволило получить упрощенное аналитическое выражение (14), которое не содержит в своем составе характеризующего микромеханику резания неопределенного безразмерного коэффициента η и более явно отражает влияние параметров шлифования и по характеристикам алмазного круга, и по режимам обработки.

Для предварительно идеально правленного шлифовального круга (без механического истирания-разрушения зерен рельефа рабочей поверхности) справедливо $\bar{X} = 2 \cdot R$, иначе $\bar{X} \approx 2 \cdot R$, и

$$H_{max} = 23,1 \cdot 10^3 \cdot \frac{\bar{X} \cdot V_{dem} \cdot \sqrt{t \cdot \rho}}{m \cdot V_{кр}}. \quad (14)$$

Приближенное математическое описание (14) ясно отображает характер и степень влияния режимов резания V_{dem} , $V_{кр}$, t ; характеристик алмазно-абразивной составляющей круга (\bar{X} , m) и макрогеометрии рабочего контакта (ρ) на формирование максимальной толщины среза единичным зерном H_{max} как микромеханической характеристики процесса.

Зависимость (10) с учетом (13) и условия $a = H_{max}$ принимает вид:

$$\sigma = \frac{\sigma_{с.ж}}{\left(\sqrt{\frac{918,25 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{дет} \cdot \sqrt{t \cdot \rho}}{m \cdot V_{кр} \cdot R^3}} - \operatorname{tg} \frac{\psi}{2} \right)}. \quad (15)$$

Уменьшить σ можно увеличением параметров $V_{дет}$, t , и уменьшением m и $V_{кр}$, так как при шлифовании кругом с неизношенными режущими зернами выполняется условие $\bar{X}/R=2$. Несомненно, в связи с износом зерен и увеличением радиуса их округления существенное влияние на характер изменения отношения H_{max}/R оказывает величина R .

При условии $Q = B \cdot V_{дет} \cdot t = \text{const}$ зависимость (15) приобретает вид:

$$\sigma = \frac{\sigma_{с.ж}}{\left(\sqrt{\frac{918,25 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot Q}{m \cdot V_{кр} \cdot R^3 \cdot B}} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{t}} - \operatorname{tg} \frac{\psi}{2} \right)}. \quad (16)$$

В этом случае глубина шлифования t незначительно влияет на σ , а увеличение производительности обработки Q приводит к уменьшению σ . Однако с увеличением Q , очевидно, увеличивается и величина R , что приведет к лишь незначительному уменьшению σ . Поэтому в зависимости (6) с увеличением Q будет доминировать второй множитель, вызывающий увеличение температуры резания при шлифовании θ с увеличением Q [12].

Таким образом, используя зависимость (6) с учетом зависимости (16), появляется возможность теоретически анализировать закономерности изменения температуры резания при шлифовании θ и производить научно обоснованный выбор рациональных условий обработки.

Закключение. В работе приведена аналитическая зависимость для определения температуры резания при шлифовании, согласно которой с увеличением глубины резания (и, соответственно, производительности обработки) температура резания первоначально увеличивается, а затем асимптотически приближается к постоянному значению, определяемому тепловым насыщением поверхностного слоя обрабатываемой детали. Расчетами установлено, что максимальное значение температуры резания при шлифовании зависит главным образом от энергоемкости обработки, т.е. в этих условиях добиться уменьшения температуры резания можно за счет повышения режущей способности шлифовального круга и снижения интенсивности трения в зоне шлифования. Это решение открывает новые технологические возможности снижения теплонапряженности процесса шлифования, так как предполагает увеличение производительности обработки фактически без увеличения температуры резания. Реализовать данное решение можно при условии существенного уменьшения условного напряжения (энергоемкости) резания, что согласуется с практическими данными [13, 14].

Список литературы: 1. Якимов, А. В. Оптимизация процесса шлифования / А. В. Якимов. М. : Машиностроение, 1975. – 175 с. 2. Резников, А. Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов / А. Н. Резников. – М. : Машиностроение, 1981. – 279 с. 3. Евсеев, Д. Г. Формирование свойств поверхностных слоев при абразивной обработке / Д. Г. Евсеев. – Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 1975. – 127 с. 4. Силин, С. С. Метод подобия при резании материалов / С. С. Силин. – М. : Машиностроение, 1979. – 152 с. 5. Якимов, А. В. Теоретические основы резания и шлифования материалов : учеб. пособие / А. В. Якимов, Ф. В. Новиков, Г. В. Новиков, Б. С. Серов, А. А. Якимов. – Одесса : ОГПУ, 1999. – 450 с. 6. Новиков, Ф. В. Повышение эффективности технологии финишной обработки деталей пар трения поршневых насосов / Ф. В. Новиков, С. М. Яценко // Физические и компьютерные технологии : труды 13 Междунар. научн.-техн. конф., 19–20 апреля 2007, г. Харьков. – Х. : ХНПК "ФЭД", 2007. – С. 8–20. 7. Новиков, Ф. В. Теоретическое обоснование условий повышения эффективности высокоскоростной обработки / Ф. В. Новиков, О. С. Кленов // Вісник НТУ "ХП". Сер. Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ "ХП". – 2014. – № 42 (1085). – С. 106–111. 8. Кленов, О. С. Математическое моделирование параметров теплового процесса при абразивной и лезвийной обработках / О. С. Кленов // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем : 36. наук. пр. – Краматорськ: ДДМА. 2014. – № 35. – С. 19–25. 9. Кленов, О. С. Определение параметров теплового процесса при шлифовании и лезвийной обработке / О. С. Кленов // Перспективні технології та прилади : 36. наук. пр. – Луцьк : Луцький НТУ, 2017. – №10 (1). – С. 69–75. 10. Кленов, О. С. Технологическое обеспечение бездефектной обработки деталей гидроаппаратуры на финишных операциях: автореф. дис. ... канд. техн. наук по специальности 05.02.08 – технология машиностроения / О. С. Кленов. – Одесса : ОНПУ, 2011. – 21 с. 11. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф. В. Новикова и А. В. Якимова. В 10-ти т. – Одесса : ОНПУ, 2002. – Т. 1: Механика резания материалов. – 580 с. 12. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф. В. Новикова и А. В. Якимова. В 10-ти т. – Одесса : ОНПУ, 2003. – Т. 2. "Теплофизика резания материалов". – 625 с. 13. Гуцаленко, Ю. Г. Алмазно-искровое шлифования материалов высокой функциональности: монография [Электронный ресурс] / Ю. Г. Гуцаленко. – Харків : Курсор, НТУ «ХП», 2016. – 272 с. [3,75 Мб] – Рос. мовою. – Код доступу : <http://web.kpi.kharkov.ua/cutting/dsghfm-monograph.pdf>. 14. Новіков, Ф. В. Фінішна обробка деталей різанням : монографія / Ф. В. Новіков, І. О. Рябенков. – Харків : ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2016. – 272 с.

Bibliography (translated): 1. Yakimov, A. V. Optimizaciya processa shlifovaniya. Moscow, Mashinostroenie, 1975, 175 p. Print. 2. Reznikov, A. N. Teplofizika processov mekhanicheskoy obrabotki materialov. Moscow, Mashinostroenie, 1981, 279 p. Print. 3. Evseev, D. G. Formirovaniye svoystv poverhnostnykh sloev pri abrazivnoy obrabotke. Saratov, Published house of the Saratov University, 1975, 127p. Print. 4. Silin, S. S. Metod podobiya pri rezanii materialov. Moscow, Mashinostroenie, 1979, 152 p. Print. 5. Yakimov, A. V., et al. Teoreticheskie osnovy rezaniya i shlifovaniya materialov. Odessa, OSPU, 1999, 450 p. Print. 6. Novikov, F. V., and S. M. Yatsenko. "Povysheniye ehffektivnosti tekhnologii finishnoy obrabotki detalей par treniya porshnevyyh nasosov". Fizicheskie i komp'yuternye tekhnologii v narodnom hozjajstve: Tr. 13-j mezhdunar. nauch.-prakt. konf. 19th-20th Apr. 2007. Kharkov, GP HMZ "FED", 2007, 8-20. Print. 7. Novikov, F. V., and O. S. Klenov. "Teoreticheskoe obosnovaniye uslovij povysheniya ehffektivnosti vysokoskorostnoy obrabotki". Visnik NTU «KhPI», 2014, No.42 (1085), 106–111. Print. 8. Klenov, O. S. "Matematicheskoe modelirovaniye parametrov teploвого processa pri abrazivnoy i lezviynoy obrabotkakh". Nadijnist' instrumentu ta optimizaciya tekhnologichnih sistem, 2014, No. 35, 19–25. Print. 9. Klenov, O. S. "Opredeleniye parametrov teploвого processa pri shlifovanii i lezviynoy obrabotke". Perspektivni tekhnologii ta priladi, 2017, No. 10 (1), 69–75. Print. 10. Klenov, O. S. Tekhnologicheskoe obespecheniye bezdefektnoy obrabotki detalей gidroapparatury na finishnykh operaciyah: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk po special'nosti 05.02.08 – tekhnologiya mashinostroeniya. Odessa ONPU, 2011, 21 p. Print. 11. Fiziko-matematicheskaya teoriya processov obrabotki materialov i tekhnologii mashinostroeniya. Ed. by F. V. Novikov and A. V. Yakimov. In 10 vols. Vol. 1: Mekhanika rezaniya materialov. Odessa, ONPU, 2002, 580 p. Print. 12. Fiziko-matematicheskaya teoriya processov obrabotki materialov i tekhnologii mashinostroeniya. Ed. by F. V. Novikov and A. V. Yakimov. In 10 vols. Vol. 2: Teplofizika rezaniya materialov. Odessa, ONPU, 2003, 625 p. Print. 13. Gutsalenko, Yu. G. Almazno-iskrove shlifuvannya materialiv visokoi funkcional'nosti. Kharkov, Kursor, NTU «KhPI», 2016, Web, 272 p., 3.75 Mb, in Russian, <<http://web.kpi.kharkov.ua/cutting/dsghfm-monograph.pdf>>. 14. Novikov, F. V., and I. O. Ryabenkov. Finishna obrobka detalей rizannyam. Kharkov, S. Kuznets KhNEU, 2016, 272 p. Print.

УДК621.9

А.А. Пермяков, д-р техн. наук, М.Г. Ищенко, Д.К. Шепелев, Харьков, Украина

КОМПОНОВКИ МОБИЛЬНЫХ СТАНКОВ ДЛЯ РЕМОНТА НЕДЕМОНТИРУЕМЫХ ДЕТАЛЕЙ И УЗЛОВ ТУРБОАГРЕГАТОВ

У статті розглянуті питання компонентики портативних мобільних верстатів агрегатно-модульної конструкції використовуваних для механічної обробки відновлених і присаднувальних поверхонь великогабаритних деталей і вузлів турбоагрегатів, що не демонтуються.

Ключові слова: верстат, обробка деталей, що не демонтуються

В статье рассмотрены вопросы компонентики портативных мобильных станков агрегатно-модульной конструкции используемых для механической обработки восстановленных и присоединительных поверхностей недемонтируемых крупногабаритных деталей и узлов турбоагрегатов.

Ключевые слова: станок, обработка недемонтируемых деталей

In the article the questions of componots of portable mobile machine-tools of unit-building construction are considered used for tooling of the recovered and joining surfaces of the undismantled details and knots of turbines.

Keywords: machine-tool, tooling of the undismantled details

Актуальной производственной задачей завода «Турбоатом» является ремонт деталей и узлов эксплуатируемых в Украине и за рубежом турбоагрегатов. Нецелесообразность, а иногда и техническая невозможность демонтажа крупногабаритных деталей делает невозможным их текущий ремонт в условиях завода. В этом случае эффективным и единственно возможным является использование мобильного портативного технологического оборудования для механической обработки восстановленных и присоединительных поверхностей недемонтируемых крупногабаритных деталей и узлов турбоагрегатов.

Агрегатно-модульный принцип разработки и производства металлорежущих станков, применяемый в настоящее время, основан на использовании унифицированных или нормализованных функционально и конструктивно законченных узлов и механизмов (модулей), выпускаемых либо станкостроительными фирмами (ограничено для своих моделей станков), либо производимых специализированными фирмами, выпускающими достаточно широкий ряд различных узлов и механизмов для различных типоразмеров станков. К технологическому металлорежущему оборудованию, создаваемому на основе принципа агрегатирования, в полной мере применимо определение "уникальное оборудование", поскольку практически каждая такая станочная система не имеет полных аналогов. Многолетняя практика создания и эксплуатации станков агрегатно-

модульной структуры постоянно указывает на то, что правильный выбор и рациональное построение компоновки оказывает большое влияние на их качество.

Во многих случаях создания специальных и универсальных станков это влияние оказывается решающим. Влияние компоновки на качество станка проявляется по двум направлениям. Во-первых, через структуру, правильный выбор которой обеспечивает необходимую универсальность или специализацию и соответствие ряду технологических и других требований. Во-вторых, через выбор рациональных конструкторских исполнений, размерных пропорций и расположения узлов в пространстве, чем обеспечиваются высокие технико-экономические показатели качества.

Значительным вкладом в развитие теории компоновки металлорежущих станков является работа Ю.Д. Врагова [1]. Он предложил представлять компоновку станка как структуру блоков: одного стационарного и нескольких подвижных, разделенных линейными или круговыми направляющими. Понятие о блочной структуре станка и способах сопряжения блоков позволяет обозначать любую компоновку с помощью структурных формул. Для описания пространственной компоновки и возможности использования математического аппарата в структурных формулах используют систему обозначений осей координат, отвечающую рекомендациям ИСО. Структурная формула компоновки – это определенная последовательность символов, обозначающих блоки компоновки, раскрывающая координатную принадлежность и способ сопряжения блоков. Примеры структурных формул компоновок станков [1] приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Примеры структурных формул компоновок станков

Станок	Структурная формула	Пояснения
Вертикальный косольно-фрезерный	$XYZO \hat{C}_v$	X – стол, Y – салазки, Z – консоль, O – станина, \hat{C}_v – вертикальный шпиндель
Токарный	$COZxbWd$	C – шпиндель, O – станина, Z – продольный суппорт, X – поперечные салазки, b – поворотные салазки, W – задняя бабка, d – поворотная резцедержавка
Зубодолбежный	$D_v uOX \cdot C / \hat{Z}_v$	D_v – поворотный стол, u – движение врезания, O – станина, X – горизонтальное перемещение (наладочное) шпиндельной головки, C / \hat{Z}_v – штоссель с вращательным и поступательным движением

Структурные формулы могут иметь различные степени уточнения. Предложенный способ обозначения компоновок станков структурными формулами и предложенный на их основе метод структурного анализа позволил Ю.Д.Врагову досконально рассмотреть особенности и принципы построения компоновок многооперационных станков.

Очевидно данный подход возможно применить для структурного анализа и синтеза компоновок металлорежущего оборудования для ремонта недемонтируемых крупногабаритных деталей и узлов турбоагрегатов. Особенностью таких станков является мобильность или возможность их использования по месту службы ремонтируемой машины, а также то, что роль стационарного блока (станины) станка может выполнить сама ремонтируемая деталь.

Анализ типажа и технико-технологических характеристик современных силовых агрегатов позволяет сделать вывод как о многообразии выбора унифицированной элементной базы для создания станков и систем агрегатно-модульной конструкции, так и о перспективности данного технологического оборудования.

Ниже приведены примеры реализованных на заводе «Турбоатом» компоновок мобильного портативного технологического оборудования для механической обработки восстановленных и присоединительных поверхностей недемонтируемых крупногабаритных деталей и узлов турбоагрегатов.

На рис. 1 приведена компоновка портативного расточного станка для совместной обработки 9 осевых отверстий с $\varnothing 128$ мм до $\varnothing 144H7$ мм во фланцевом соединении вала генератора и вала турбины гидроагрегата Среднеднепровской ГЭС. В состав изделия входят: машина расточная; машина пневматическая (привод); подставка для установки машин; детали крепежа подставки, машин и наладки приспособления; комплект запасных деталей.

На рис. 2 показана компоновка портативного сверлильного станка для обработки отверстий $\varnothing 30H7$ в цилиндре и корпусе рабочего колеса ЛАРДЖИ ГЭС (Индия).

На рис. 3 приведен пример реализованной компоновки мобильного портативного станка для фрезерования паза под уплотнительный шнур в нижнем кольце направляющего аппарата гидротурбины Кременчугской ГЭС. Мобильный станок состоит из опоры, фрезерной головки, включающей в себя устройство вертикальной подачи, механизма горизонтальной подачи и привода горизонтальной подачи. Перед обработкой станок опорой поз. 1 устанавливается центрирующими выступами в отверстия $\varnothing 280A$, центрируется относительно оси фрезеруемого паза, размеченной на нижнем кольце направляющего аппарата и закрепляется.

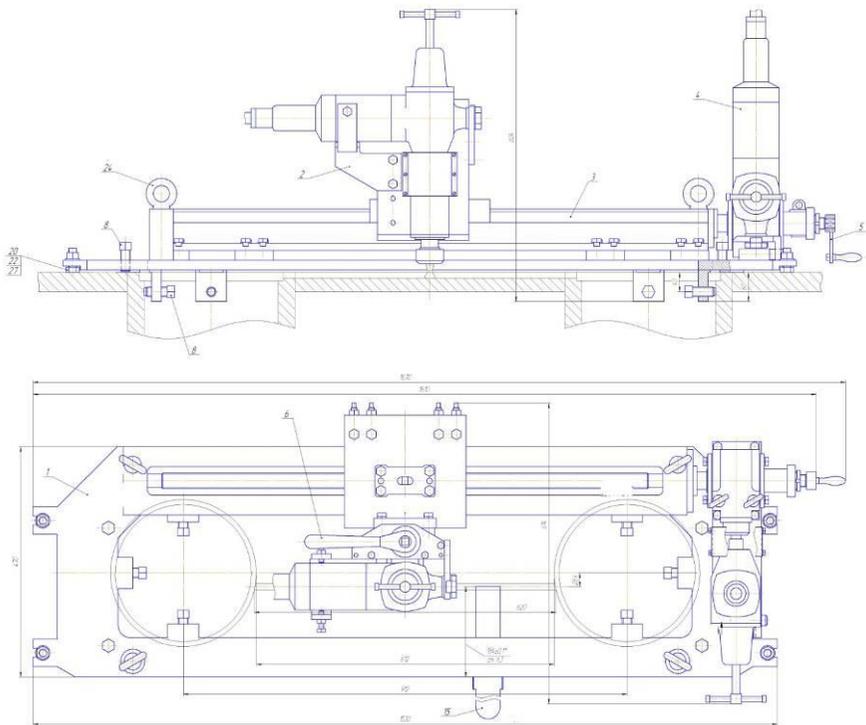


Рисунок 3 – Компоновка **OXZCv** мобильного портативного фрезерного станка

Выводы: Актуальной остается задача систематизации компоновок мобильного портативного технологического оборудования, создаваемого по агрегатно-модульному принципу, с целью типизации компоновочных схем и унификации конструкций станков для механической обработки недемонтируемых крупногабаритных деталей и узлов турбоагрегатов.

Список используемых источников: 1. Врагов Ю.Д. Анализ компоновок металлорежущих станков: (Основы компонентики) – М.:Машиностроение, 1978. – 208 с.

Bibliography (transliterated): 1. Vragov J.D. Analysis of componots of metal-cutting machine tools : (Bases of componetics) – М.: Mashinostroenie, 1978. – 208 s.

УДК 621.919.2

Е.К. Посвятенко, д-р техн. наук, П.А. Аксьом,
Н.І. Посвятенко, канд. техн. наук, Київ, Україна

ВПЛИВ ПОПЕРЕДНЬОЇ ХОЛОДНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ І РОСЛИННИХ МАСТИЛЬНО-ОХОЛОДЖУЮЧИХ РІДИН НА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ АУСТЕНІТНИХ СТАЛЕЙ

В даній статті запропоновано математичну модель оброблюваності аустенітних сталей, яку перевірено на адекватність експериментально. Встановлено, що основними факторами, які визначають оброблюваність, є попереднє холодне пластичне деформування (ХПД) у поєднанні зі застосуванням мастильно-охолоджуючих рідин (МОР) на рослинній основі. Для реалізації ХПД розроблено метод поперечного об'ємного стиску. Визначено провідну роль дислокацій у поліпшенні оброблюваності.

В данной статье предложена математическая модель обрабатываемости аустенитных сталей, которая проверена на адекватность экспериментально. Установлено, что основными факторами, которые определяют обрабатываемость, являются холодная пластическая деформация (ХПД) в сочетании с применением смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) на растительной основе. Для реализации ХПД разработан метод поперечного объемного сжатия. Определена ведущая роль дислокаций в улучшении обрабатываемости.

In this article it is proposed a mathematical model for the processing of austenitic steels, which is tested for adequacy experimentally. It has been established that the main factors which determine the workability are cold plastic deformation (CPD) combined with the use of vegetable-based lubricating coolants. To implement the CPD, a transverse volume compression method has been developed. The leading role of dislocations in improving machinability is determined.

Сталі аустенітного класу (жаро-, корозійно- та зносостійкі) мають виключно низьку оброблюваність різанням. Це обмежує застосування таких сталей у точних деталях машин. Більшість виробів із аустенітних сталей використовуються у техніці без фінішної механічної обробки. З метою розширення номенклатури деталей, нами проведено комплексне дослідження, кінцевим результатом якого було поліпшення оброблюваності аустенітних сталей різанням.

Класиками науки про механіку різання металів, якими є Розенберг О.М., Зорев М.М., Полетика М.Ф., Лоладзе Т.М. та ін., показано, що коефіцієнт усадки стружки ξ та довжина повного контакту стружки з передньою поверхнею інструменту s можуть надійно свідчити про оброблюваність того чи іншого металу [1-3]. Зменшення цих показників однозначно означатиме поліпшення оброблюваності.

Виходячи з цих передумов та враховуючи наші попередні дослідження [4-8], встановлено, що у зоні низьких та середніх швидкостей різання, характерних для обробки складним інструментом із швидкорізальної сталі

(протягування, нарізання різьби, довбання тощо), факторами сильного впливу на оброблюваність аустенітних сталей є попередня обробка останніх холодним пластичним деформуванням (ХПД) та введення у зону різання рослинних мастильно–охолоджувальних рідин (МОР). Дещо слабше діє на процес швидкість різання, а інші фактори, у тому числі і передній кут, майже не впливають на оброблюваність у діапазоні досліджуваних факторів.

Для опису об'єкту дослідження, тобто оброблюваності аустенітних сталей була використана кібернетична схема “чорний ящик”. В результаті побудована математична модель:

$$y = 3,786 + 0,81x_1 - 0,09x_2 + 0,13x_3 + 0,07x_1x_2 + 0,09x_1x_3 + 0,27x_2x_3 + 0,11x_1x_2x_3 \quad (1)$$

Фактори ХПД (H_V , H_μ – МПа), МОР (вид) та швидкість різання (м/с) позначено відповідно символами x_1 , x_2 та x_3 . Коефіцієнти рівняння знайдено розрахунками та з експериментів, причому похибка була менше допустимої (4%). Таким чином, математична модель (1) є адекватною.

Роль попереднього ХПД полягає у тому, що при проведенні процесу виконується частина роботи, яку мала б виконати обробка різанням недеформованої аустенітної сталі. Використання середовища рослинного походження поліпшує контактні процеси на передній поверхні інструменту. Отже, в результаті отримуємо подвійний позитивний ефект: з боку зони стружкоутворення через попереднє об'ємне ХПД, а з боку контактної зони – через ефективне екологічно чисте рослинне середовище.

У процесі досліджень застосовувався запропонований нами новий ефективний, але простий метод поперечного стиску оброблюваного матеріалу [9], що забезпечувало необхідну кількість цього матеріалу для експериментів. Величина попередньої холодної деформації регулювалась у широких діапазонах. Для цього було достатньо гідравлічного пресу зусиллям 200 тс.



Рисунок 1 – Установка для отримання металографічних шліфів

На рис. 1 показано установку для отримання металографічних шліфів Beta Grinder–Polisher, виробництва фірми Buehler, що знаходиться в НТУУ “Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського”, яка використовувалася нами у дослідницькій роботі.

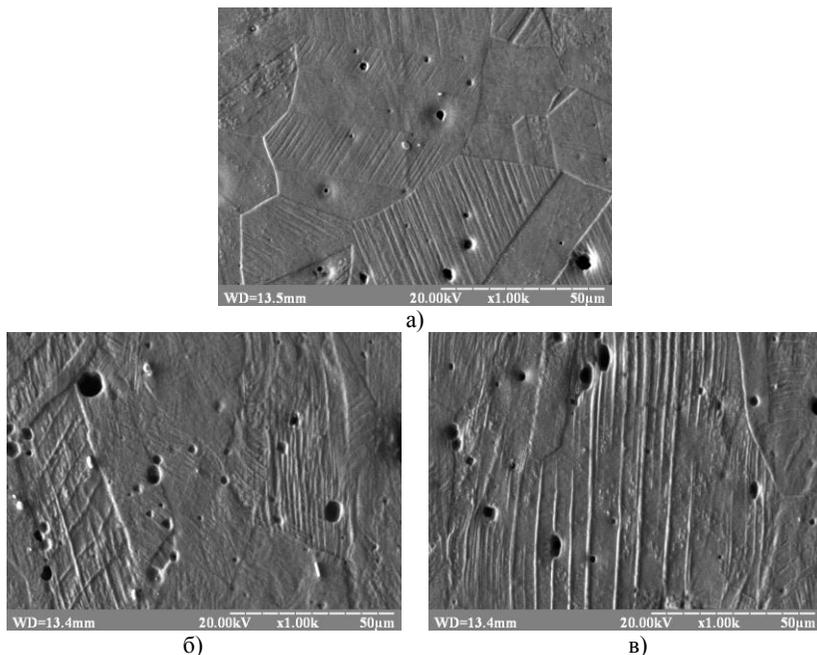


Рисунок 2 – Розподіл дислокацій (крупні темні ямки – скупчення дислокацій) по зразках із аустенітної сталі 08X18H10:
а – у початковому стані; б, в – після об’ємного ХПД ($\varepsilon = 46\%$)

Теорія та практика обробки матеріалів різанням передбачає для осучаснення даної науки перехід від чисто феноменологічних методів до фізичних. У нашому дослідженні також використано дане положення. Виходячи з цього, було проведено серію точних експериментів із застосуванням електронної мікроскопії за допомогою мікроскопа РЕМ–106И. Метою цих експериментів було виявлення впливу об’ємного ХПД на густину дислокацій у аустенітних сталях.

На рис. 2, як приклад, подано розподіл дислокацій по глибині зразків із сталі 08X18H10 (AISI 304) у початковому (рис. 2а) та після обробки ХПД з деформацією $\varepsilon = 46\%$ стані (рис. 2б,в).

Обробка мікروشліфів за відомими методиками показала, що густина дислокацій ρ в результаті обробки зразків об’ємним ХПД збільшується приблизно у 4 рази.

Скупчення дислокацій служить основою для формування мікротріщин у матеріалі, що сприяє поліпшенню оброблюваності різанням аустенітних сталей.

Було проведено серію експериментів по виявленню впливу МОР на процес вільного ортогонального різання досліджуваних сталей марок 12Х15Г9НД, 08Х18Н10, 40Х13 та 110Г13Л, різцем із сталі Р6М5 з переднім кутом $\gamma = 15^\circ$ та швидкістю 0,2 м/с з товщиною зрізу 0,03 мм. Як МОР використовувались сульфозфрезол Р, три види олій (ріпака, льону та соняшнику); для порівняння різання здійснювалось також без МОР. Попереднє ХПД виконувалась за методом поперечного об'ємного стиску з величиною $\varepsilon = 46\%$.

Результати експериментів наведено у табл. 1.

Таблиця 1 – Вплив попереднього холодного пластичного деформування та виду МОР на усадку стружки ζ та повну довжину контакту стружки з передньою поверхнею інструменту c

Марка сталі	ХПД, $\varepsilon = 46\%$	Масиль-охолоджуюча рідина (МОР)									
		Без МОР		Сульфо-фрезол Р		Ріпакова олія		Олія льону		Соняшникова олія	
		ζ	c , мм	ζ	c , мм	ζ	c , мм	ζ	c , мм	ζ	c , мм
12Х15Г9НД (AISI 201)	Незміцнена $HV = 3,70$ ГПа	3,9	0,19	2,85	0,12	2,34	0,09	2,44	0,10	2,36	0,09
	Зміцнена $HV = 4,96$ ГПа	3,2	0,14	2,68	0,11	2,15	0,08	2,17	0,08	2,28	0,08
08Х18Н10 (AISI 304)	Незміцнена $HV = 2,32$ ГПа	4,2	0,22	2,91	0,12	2,41	0,09	2,50	0,10	2,43	0,10
	Зміцнена $HV = 3,85$ ГПа	3,6	0,17	2,76	0,11	2,25	0,08	2,26	0,08	2,36	0,09
40Х13 (AISI 420)	Незміцнена $HV = 2,14$ ГПа	4,6	0,25	3,15	0,14	2,66	0,11	2,70	0,11	2,68	0,11
	Зміцнена $HV = 3,15$ ГПа	3,9	0,19	3,00	0,13	2,47	0,10	2,46	0,10	2,58	0,10
110Г13Л (A128)	Незміцнена $HV = 6,00$ ГПа	5,1	0,29	3,75	0,18	3,31	0,15	3,35	0,15	3,36	0,15
	Зміцнена $HV = 3,85$ ГПа	4,5	0,24	3,56	0,17	3,13	0,14	3,15	0,14	3,25	0,14

Аналіз результатів експериментів показує, що всі види олій дають приблизно однакові результати щодо поліпшення оброблюваності аустенітних сталей. Тому у подальшому, керуючись вартістю олій, вибираємо найдешевшу – ріпакову. Порівняння цієї олії з найпоширенішим традиційним для процесів різання, що розглядаються, сульфозфрезолом Р, дало наступні результати. Сумісна дія ХПД і середовища при різанні аустенітної сталі 12Х15Г9НД знижує коефіцієнт усадки стружки на 25%, а повної довжини контакту – на 34%. При обробці аустенітної сталі 08Х18Н10 ці показники відповідно такі: зниження ζ на 24%, а c – на 34%. Обробка зносостійкої аустенітної сталі 110Г13Л характеризується наступними результатами: зменшення коефіцієнта усадки стружки на 16%, а повної довжини контакту – на 22%. Різання контрольної марки феритної нержавіючої сталі 40Х13 також показало поліпшення оброблюваності: ζ на 21% і c на 29%.

Отже, попереднє ХПД у поєднанні з використанням сучасних МОР на рослинній основі є потужним засобом поліпшення оброблюваності деталей із аустенітних сталей. Це, наприклад, видно із рис. 3, де представлені фрагменти процесу стружкоутворення при вільному ортогональному різанні сталі 12Х15Г9НД, зміцненою поперечним стиском у середовищі ріпакової олії (а) та сульфозфрезолу Р (б). Поліпшення оброблюваності цієї сталі характеризується, крім зменшення довжини контакту стружки по передній поверхні інструменту і коефіцієнту усадки стружки, меншим радіусом завитка останньої на 28%.



Рисунок 3 – Фрагменти стружкоутворення при вільному ортогональному різанні сталі 12Х15Г9НД (АІSІ 201), зміцненої по схемі поперечного стиску з деформацією 46%, у середовищі ріпакової олії (а) та сульфозфрезолу Р (б)

Для повернення початкових властивостей деталей із аустенітних сталей (високої жаро-, корозійно- та зносостійкості) автори рекомендують як заключну операцію прецизійну термообробку, наприклад, високе відпускання з мінімальними термічними деформаціями деталей.

Висновок

Для підвищення оброблюваності аустенітних сталей рекомендується застосовувати попереднє об'ємне ХПД з використанням екологічно чистих мастил рослинного походження. Таке поєднання дозволяє отримати сумісний позитивний ефект при різанні з боку зони стружкоутворення і контактної зони на передній поверхні інструменту. Поліпшення оброблюваності при використанні попереднього ХПД пояснюється збільшенням густини дислокацій, об'єднання яких призводить до появи мікротріщин у оброблюваному матеріалі. Повернення початкових високих експлуатаційних властивостей виробів із аустенітних сталей (жаро-, корозійно- та зносостійкості) рекомендується застосуванням прецизійної фінішної термообробки, наприклад, високого відпускання.

Список використаних джерел: 1. *Розенберг А.М.* Элементы теории процесса резания металлов / А.М. Розенберг, А.Н. Ерёмин. – М.; Свердловск: Mashgiz, 1956. – 318 с. 2. Развитие науки о резании металлов / [коллектив авторов]; под ред. *Н.Н. Зорева*. – М.: Машиностроение, 1967. – 416 с. 3. *Полетика М. Ф.* Контактные нагрузки на режущих поверхностях инструмента / М. Ф. Полетика. – Москва: Машиностроение, 1969. – 148 с. 4. *Посвятенко Е.К.* Основні напрямки поліпшення оброблюваності деталей із аустенітних сталей / Е.К. Посвятенко, П.А. Аксьом, Р.В. Будяк // Вісник Національного транспортного університету. Серія: “Технічні науки”. – 2016. – №1 (34). – С. 370-377. 5. *Посвятенко Е.К.* Особливості обробки деталей засобів транспорту із аустенітних сталей / Е.К. Посвятенко, П.А. Аксьом // Вісник Національного транспортного університету. Серія: “Технічні науки”. – 2015. – №1 (31). – С. 443-449. 6. *Посвятенко Е.К.* Відновлення деталей засобів транспорту із аустенітних сталей / Е.К. Посвятенко, П.А. Аксьом // Вісник Національного транспортного університету. Серія: “Технічні науки”. – 2015. – №2 (32). – С. 210-218. 7. *Посвятенко Е.К.* Розробка наукових основ поліпшення оброблюваності деталей транспортних засобів із аустенітних сталей / Е.К. Посвятенко, П.А. Аксьом // Управління проектами, системний аналіз і логістика. Науковий журнал, випуск 18, 2016, частина 1: серія “Технічні науки”; – С. 94-100. 8. *Посвятенко Е.К.* Про фізичну природу поліпшення оброблюваності аустенітних сталей / Е.К. Посвятенко, Н.І. Посвятенко, П.А. Аксьом // Инженерия поверхности и реновация изделий: Материалы 17-й Международной научно-технической конференции, 29 мая – 02 июня 2017 г., г. Одесса – Киев: АТМ Україна, 2017. – С. 153-157. 9. *Аксьом П.А.* Дослідження холодного пластичного деформування методом поперечного стискання / П.А. Аксьом // Теорія та практика раціонального проектування виготовлення і експлуатації машинобудівних конструкцій: Матеріали конференції. – Львів: КІНПАТРИ ЛТД. – 2016. – С. 16-17.

Bibliography (transliterated): 1. Rozenberg A.M., Erjomin A.N. Jelementy teorii processa rezanija metallov. – M.; Sverdlovsk: Mashgiz, 1956. – 318 s. 2. Razvitie nauki o rezanii metallov / [kollektiv avtorov]; pod red. N.N. Zoreva. – M.: Mashinostroenie, 1967. – 416 s. 3. Poletika M. F. Kontaktnye nagruzki na rezhushih poverhnostjeh instrumenta. – Moskva: Mashinostroenie, 1969. – 148 s. 4. Posvjatenko E.K. Aks'om, P.A., Budjak R.V. Osnovni naprjamki polipshennja obroblyvanosti detalej iz austenitnih stalej / Visnik Nacional'nogo transportnogo universitetu. Serija: “Tehnichni nauki”. – 2016. – №1 (34). – S. 370 – 377. 5. Posvjatenko E.K., Aks'om P.A. Osoblivosti obrobki detalej zasobiv transportu iz austenitnih stalej / Visnik Nacional'nogo transportnogo universitetu. Serija: “Tehnichni

nauki”. – 2015. – №1 (31). – S. 443 – 449. 6. Posvjatenko E.K., Aks'om P.A. Vidnovlennja detalej zasobiv transportu iz austenitnih stalej / Visnik Nacional'nogo transportnogo universitetu. Serija: “Tehnichni nauki”. – 2015. – №2 (32). – S. 210 – 218. 7. Posvjatenko E.K., Aks'om P.A. Rozrobka naukovih osnov polipshennja obroblyvanosti detalej transportnih zasobiv iz austenitnih stalej / Upravlinnja proektami, sistemnij analiz i logistika. Naukovij zhurnal, vipusk 18, 2016, chastina 1: serija “Tehnichni nauki”. – S. 94 – 100. 8. Posvjatenko E.K., Posvjatenko N.I., Aks'om P.A. Pro fizichnu prirodu polipshennja obroblyvanosti austenitnih stalej / Inzhenerija poverhnosti i renovacija izdelij: Materialy 17-j Mezhdunarodnoj nauchno–tehničkoj konferencii, 29 maja – 02 ijunja 2017 g., g. Odessa – Kiev: ATM Ukraina, 2017. – S. 153 – 157. 9. Aks'om P.A. Doslidzhennja holodnogo plastichnogo deformuvannja metodom poperechnogo stiskannja / Teorija ta praktika racional'nogo proektuvannja vigotovlennja i ekspluatacii mashinobudivnih konstrukcij: Materiali konferencii. – L'viv: KINPATRI LTD. – 2016. – S. 16-17.

УДК 621.923

И. Н. Пыжов, д-р техн. наук, Харьков, Украина

ОСОБЕННОСТИ САМОЗАТАЧИВАНИЯ АЛМАЗНЫХ КРУГОВ НА ОРГАНИЧЕСКИХ СВЯЗКАХ ПРИ ШЛИФОВАНИИ ПСТМ

Розглянуто питання, пов'язані з особливостями процесу самозаточування алмазних кругів на органічних зв'язках. Висловлено і доведено припущення про те, що контакт двох практично рівно твердих матеріалів повинен обумовлювати особливості механізму самозаточування алмазоносного шару круга. Вперше експериментально встановлена і пояснена фізична природа такого явища як періодичність процесу самозаточування алмазоносного шару круга. Показано визначальну роль силового фактора в цьому процесі. Висловлено припущення, що періодичність самозаточування круга свідчить про наявність резерву для підвищення ефективності процесу шліфування.

Ключові слова: полікристалічні надтверді матеріали, алмазний круг, алмазоносний шар круга, ріжучий рельєф круга, органічна зв'язка, самозаточування круга, нормальна і тангенціальна складові сили різання, тиск в зоні контакту, ефективна потужність шліфування, періодичність процесу шліфування

Рассмотрены вопросы, связанные с особенностями процесса самозатачивания алмазных кругов на органических связках. Высказано и доказано предположение о том, что контакт двух практически равнотвердых материалов должен обуславливать особенности механизма самозатачивания алмазоносного слоя круга. Впервые экспериментально установлена и объяснена физическая природа такого явления как периодичность процесса самозатачивания алмазоносного слоя круга. Показана определяющая роль силового фактора в этом процессе. Высказано предположение, что периодичность самозатачивания круга свидетельствует о наличии резерва для повышения эффективности процесса шлифования.

Ключевые слова: поликристаллические сверхтвердые материалы, алмазный круг, алмазоносный слой круга, режущий рельеф круга, органическая связка, самозатачивание круга, нормальная и тангенциальная составляющие силы резания, давление в зоне контакта, эффективная мощность шлифования, периодичность процесса шлифования

Questions related to the peculiarities of the process of self-sharpening of diamond wheels on organic bonds are considered. The assumption is made that the contact of two practically equally hard materials should determine the features of the self-sharpening mechanism of the diamond-bearing layer of the wheel. For the first time, the physical nature of such a phenomenon as the periodicity of the process of self-sharpening of the diamond-bearing layer of the wheel has been experimentally established and explained. The determining role of the force factor in this process is shown. It is suggested that the periodicity of self-sharpening of the wheel indicates the availability of a reserve to improve the efficiency of the grinding process.

Keywords: polycrystalline superhard materials, diamond wheel, diamond-bearing layer of the wheel, cutting wheel relief, organic bond, self-sharpening of the wheel, normal and tangential components of the cutting force, pressure in the contact zone, effective grinding power, periodicity of the grinding process

1. Постановка проблемы. Унікальні фізико-механічні властивості полікристалічних сверхтвердих матеріалів (ПСТМ) к которым в первую

очередь относятся синтетические поликристаллические алмазы (СПА) и плотные модификации нитрида бора (ПТНБ) позволили им сразу же найти возможность широкого использования во многих областях народного хозяйства. Отмеченные выше материалы составляют особую группу обрабатываемых материалов (ОМ). Технологии их производства постоянно совершенствуются [1], [2]. В тоже время существует серьезная проблема обработки ПСТМ. Затраты на изготовление инструментов из них достаточно велики, так как наука и техника пока не располагают абразивными материалами, твердость которых превышала бы твердость алмаза на необходимую с точки зрения эффективности процесса резания величину.

На настоящее время одним из наиболее распространенных методов формообразования изделий (в том числе и режущих инструментов) из ПСТМ является алмазное шлифование кругами на самозатачивающихся органических связках. Исследования показали, что удельных расход алмазов при использовании таких кругов достигает 15 карат на карат снятого СПА [3]. В условиях примерного равенства твердостей обрабатывающего (алмазных зерен круга) и обрабатываемого материалов (ПСТМ) классический механизм самозатачивания кругов не может реализоваться. Вследствие этого возникает необходимость постоянной правки рабочей поверхности кругов (РПК), например, абразивными брусками, что является существенным недостатком такого процесса обработки ПСТМ, поскольку приводит как к дополнительному нерациональному расходованию алмазных зерен, так и к образованию большого количества абразивного шлама, т.е. негативно отражается на культуре производства. Таким образом, отсутствие представлений об особенностях механизма самозатачивания алмазных кругов на органических связках не позволяет вскрыть их возможные потенциальные резервы при обработке ПСТМ. Представленная работа посвящена исследованию физических и технологических особенностей процесса обработки ПСТМ и выявлению на их основе механизма самозатачивания алмазного слоя круга. В конечном итоге это должно позволить установить пути повышения эффективности рассматриваемого процесса обработки.

2. Анализ последних исследований и публикаций. На сегодняшний день является доказанным, что в условиях, когда микротвердость обрабатываемого (ПСТМ) и обрабатывающего (алмазные зерна круга) материалов равны или сопоставимы, внедрение зерен в обрабатываемый материал практически отсутствует, а сьем припуска осуществляется за счет хрупкого микроразрушения ПСТМ [3]. А для этого необходимо, чтобы на алмазных зернах постоянно имелись острые микро – и субмикроромки.

В условиях высокосилового контактного взаимодействия с ПСТМ высота выступания алмазных зерен (Н) над уровнем связки резко снижается и одновременно с этим растет число зерен с площадками износа (рис. 1).

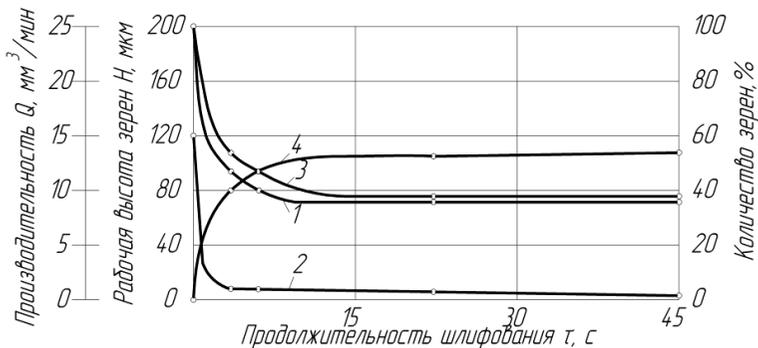


Рисунок 1 – Влияние времени шлифования СПА на изменение состояния РПК 1–Н (Z-200/160); 2–Q; 3, 4–количество зерен острых (3) и с площадками износа (4).

Острые микро – и субмикроромки быстро исчезают, а площадки износа на зернах приобретают устойчивость (рис. 2).

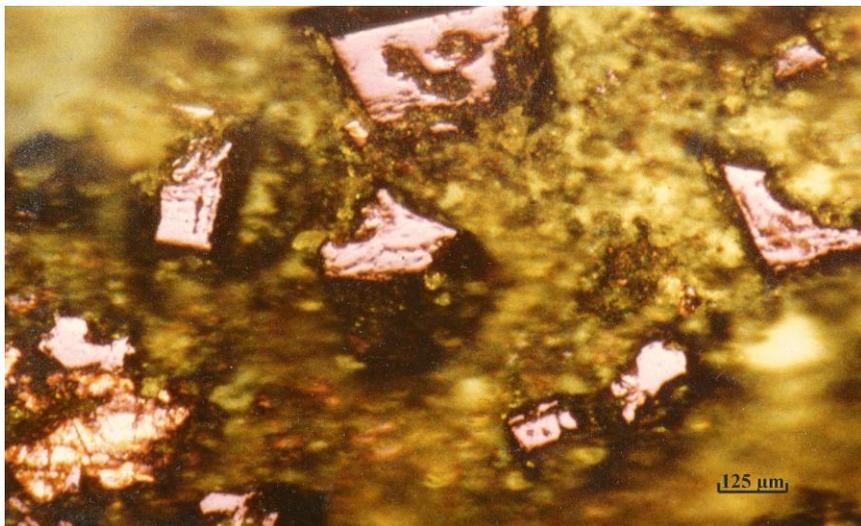


Рисунок 2 – РПК после 15 секунд шлифования СПА

В силу явления приспособляемости [4] процесс шлифования катастрофически быстро трансформируется в процесс трения

высокоизносостойкой пары «ПСТМ – алмазные зерна». Линейный съем припуска с ПСТМ практически прекращается. В результате этого производительность обработки (Q) близка к нулю.

Для постоянного или периодического возобновления процесса формирования микро – и субмикромок на зернах круга необходимо создавать условия для их самозатачивания. Таким образом, в основе высокопроизводительной обработки ПСТМ в первую очередь лежит процесс самозатачивание алмазных зерен.

Несмотря на то, что шлифование является достаточно хорошо изученным процессом, многие его вопросы остаются и в настоящее время открытыми в силу сложности явлений, протекающих в зоне контакта круга с деталью. Это относится и к механизму самозатачивания кругов. Мнение исследователей на этот счет неоднозначное. Одни авторы считают, что самозатачивание происходит в основном за счет постепенного дробления зерен, другие утверждают обратное, что обновление режущей поверхности кругов главным образом осуществляется путем выпадения из связки целых зерен, третьи разделяют и то и другое мнение [4-9]. При этом процесс будет протекать стабильно лишь в том случае, если связка круга удаляется (в результате взаимодействия с продуктами диспергирования, а также выпадения отдельных зерен) со скоростью, равной интенсивности износа зерен.

Поскольку дробление зерен или их выпадение из связки происходит при определенных величинах действующих на них сил, можно считать силовую напряженность процесса шлифования одним из наиболее ответственных факторов, определяющих режим работы круга. В свою очередь уровень силовой напряженности во многом определяется условиями обработки, т. е. режимными параметрами и характеристикой круга (вид связки, марка зерен и др.).

Впервые на особую роль связки в условиях алмазного шлифования указал проф. М. Ф. Семко [10]. Использование в качестве абразива самого износостойкого и твердого в природе вещества – алмаза, а также других сверхтвердых материалов потребовало нового подхода к выбору связки круга. Благодаря этому появилась целая гамма различных связок, в том числе и металлических, обладающих такими важными свойствами, как повышенная степень алмазоудержания, высокая износостойкость, теплопроводность и др. [11].

Как известно, ПСТМ относятся к хрупким материалам и имеют твердость (49-100 ГПа) сопоставимую с твердостью алмазных зерен. Последнее обстоятельство исключает возможность внедрения зерен круга в ПСТМ и съем припуска с последнего осуществляется в основном путем хрупкого микроскалывания мельчайших частиц с его поверхности [3]. А это ведет к тому, что контакт обрабатываемого ПСТМ со связкой становится неизбежен.

Практическое отсутствие превышения твердости алмазных зерен круга над ОМ обуславливает интенсивность их износа, в сотни раз большую, чем при обработке традиционных материалов (твердые сплавы, керамики и т.д.). И вполне понятно, что в таких условиях связка круга не может удалиться естественным путем (за счет взаимодействия с продуктами диспергирования) с такой же скоростью. Тем более что при этом стружка, как таковая (в традиционном понимании), отсутствует. Поэтому к связке должны предъявляться особые требования, поскольку именно она становится ответственной за многие явления, протекающие в зоне шлифования [10], а, следовательно, и за уровень выходных показателей процесса шлифования.

Анализ литературных источников информации показал на отсутствие данных о механизме самозатачивания алмазных кругов на органических связках, что не позволяет в полной мере обеспечить эффективность процесса шлифования ПСТМ.

3. Цель исследования. Установление особенностей и закономерностей процесса самозатачивания алмазных кругов на органических связках при шлифовании ПСТМ.

4. Основные материалы исследования. Анализ результатов исследований в рассматриваемой предметно области позволяет заключить, что при шлифовании ПСТМ механизм самозатачивания алмазных кругов, если такой процесс возможен вообще, должен иметь принципиальное отличие по сравнению с обработкой материалов обычной твердости. Этим и можно объяснить отсутствие в литературе единого мнения об эффективности применения алмазных кругов на органических, металлоорганических и металлических связках для обработки ПСТМ.

Это обстоятельство свидетельствует о необходимости проведения исследований, которые позволили бы установить физическую сущность процесса самозатачивания алмазных кругов при обработке особой группы высокотвердых ОМ, что может позволить предложить пути повышения эффективности процесса их шлифования.

В связи с этим были проведены экспериментальные исследования, направленные на формирование представлений о механизме самозатачивания алмазных кругов на органических связках при шлифовании ПСТМ. Выполненные ранее исследования по обработке ПСТМ предварительно запрошенным алмазным кругом на органической связке показали, что в случае шлифования с постоянным усилием прижатия образца к РПК («упругая» схема, $P_n \approx 1$ МПа) режущий рельеф последнего быстро изнашивается (в течение 15-30 с) и съём припуска с ПСТМ полностью прекращается [3]. В то же время при шлифовании твердого сплава такой режим обеспечивает устойчивую работу в режиме самозатачивания круга [11]. Как показали наши исследования, такая картина не меняется и при более чем десятикратном увеличении давления в контакте. Так, например, при

шлифовании СПА в диапазоне давлений $P_n=0-35$ МПа происходит трение пары «ПСТМ - алмазные зерна» без заметного износа ее элементов. Например, самозатачивание круга на связке В2-01 (связка на основе пудвербакелита, наполнитель – карбид бора [12]) начинается при $P_n \approx 35$ МПа. Интенсивный рост силы P_z свидетельствует о съеме припуска с ПСТМ. Экспериментально установлено, при увеличении давления в контакте с 35 до 70 МПа производительность процесса возрастает практически с нуля до $13,5 \text{ мм}^3/\text{мин}$, удельный расход алмазов снижается со 100 до $40 \text{ мг}/\text{мм}^3$, сила резания P_z достигает значения 140 Н, что приводит к возрастанию коэффициента шлифования с 0 до 0,1. Несмотря на рост силы P_z , удельная энергоемкость процесса резко снижается и при $P_z=140$ Н составляет $V=0,66 \cdot 10^4 \text{ Дж}/\text{мм}^3$ (ее значение в зоне трения высокоизносостойкой пары «алмазные зерна круга - ПСТМ» превышает $10 \cdot 10^4 \text{ Дж}/\text{мм}^3$). Это можно объяснить интенсивным ростом производительности процесса. Приведенные данные свидетельствуют о том, что, процесс шлифования в режиме самозатачивания круга с точки зрения многих выходных показателей становится эффективным.

Высокое значение температуры в зоне шлифования $T \approx 980$ К свидетельствует об активном участии связки круга в процессе обработки. Здесь следует отметить, что принципиально важным условием возможности нормального ведения процесса в этом случае является обильное охлаждение зоны шлифования. В противном случае в контакте ПСТМ с РПК развиваются очень высокие температуры ($T \geq 1500$ К), что приводит к интенсивному выгоранию связки круга и повышению брака изделий. В таких условиях очень важно использовать эффективные способы подачи СОТС в зону шлифования.

Аналогичная картина наблюдается и в случае шлифования ПТНБ, однако контактные нагрузки при этом имеют значительно меньшие значения (съем припуска начинается при $P_n \geq 15$ МПа). Это можно объяснить тем, что твердость алмазных зерен круга все-таки превышает твердость ОМ.

Исследование процесса обработки ПСТМ по «жесткой» схеме предварительно вскрытым кругом показало, что он протекает не стабильно, а характеризуется периодическими всплесками физических и технологических показателей обработки (рис. 3). При этом, как видно из рисунка, процесс шлифования можно разделить на две зоны: первая – зона врезания ($\tau=0-250$ с) и вторая – зона установившегося периодического процесса ($\tau > 250$ с). Если в первой зоне изменения показателей обработки носят случайный характер, имеют неодинаковый шаг и величину и зависят во многом от исходного состояния круга, то во второй зоне наблюдается их четкая повторяемость через определенный период времени (в данном случае $\tau \approx 80$ с). Такая картина наблюдается на протяжении всего времени работы круга до его полного износа. Следовательно, этот результат можно рассматривать как

положительный ответ на вопрос о возможности самозатачивания алмазных кругов на органических связках при шлифовании ПСТМ.

Высокие нагрузки в режиме самозатачивания круга вызывают значительную величину натяга в технологической системе. В связи с этим все эксперименты по шлифованию ПСТМ по «жесткой» схеме выполнялись таким образом, чтобы поликристалл выходил за пределы рабочей поверхности не более чем на 1/4 часть размера своего торца. Это позволяло исключить периодические удары ПСТМ о внутреннюю и наружную кромки торцевого круга, а, следовательно, снизить вероятность их взаимного разрушения.

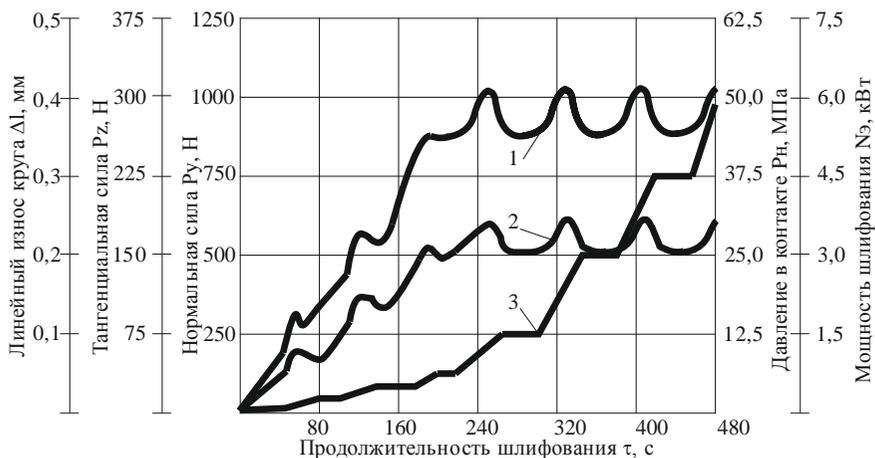


Рисунок 3 – Изменение выходных показателей обработки во времени
1 – P_y (P_n); 2 – P_z ($N_э$); 3 – Δl

Условия обработки: круг 12A2-45°150x10x2x32 AC4 125/100 B2-01 100%
 $V_k=20$ м/с, $S_{пр.}=1$ м/мин, СОТС – 3%-й раствор Na_2CO_3 в воде
 Обрабатываемый материал – СПА марки АСБ [3] $Sk \approx 20$ мм²)

Анализ РПК после шлифования ПСТМ показал, что физическая природа наблюдаемых при этом всплесков связана с локальным характером самозатачивания зерен алмазного круга, что является особенностью процесса обработки.

Одной из возможных причин разрушения зерен, на первый взгляд, должна быть сила P_y , величина которой может достигнуть такого значения, когда будет превзойден предел прочности алмазных зерен на сжатие. Однако расчеты показывают, что этого не происходит. Так, например, для условий, представленных на рис. 3, максимальная величина силы P_y равна 1060 Н,

а статическая допустимая разрушающая нагрузка для зерен марки АС6 зернистостью, например 80/63, составляет [Рсж.] \approx 4,2 Н.

Оптические исследования режущего рельефа круга на участке установившейся периодичности показали, что в контакте с ПСТМ находится 50-80% зерен от их максимально возможного количества. Практически все зерна, находящиеся на РПК в пределах площади контакта S_k с ПСТМ (за исключением выпавших), контактируют с ПСТМ, что является очень важной особенностью рассматриваемого процесса.

Теоретически разрушение зерен произойдет в том случае, если будет соблюдаться условие:

$$P_{сж.} = \frac{P_y}{n_3} \geq [P_{сж.}], \quad (1)$$

где $P_{сж.}$ – нагрузка, действующая на одно зерно, Н; P_y – нормальная составляющая силы резания, Н; n_3 – количество зерен в контакте с ПСТМ, шт.

В нашем случае для поликристалла СКМ ($S_k=20 \text{ мм}^2$) расчетное число зерен в контакте составляет 1000 шт.

Тогда на основании выражения (1) имеем:

$$P_{сж.} = \frac{1060}{0,5 \cdot 1000} = 2,1 < [4, 2].$$

Следовательно, даже при учете того, что в контакте с ПСТМ находится половина возможного числа зерен, максимальная нагрузка, действующая на них, в 2 раза меньше, чем необходимая для разрушения. А если учесть тот факт, что прочностные свойства связки позволяют зернам вдавливаться в нее, можно с определенной уверенностью исключить возможность массового разрушения зерен под воздействием нормальной нагрузки.

На такую возможность указывают данные исследований, выполненных под руководством проф. И. П. Третьякова. Они показали, что сила Рсж., необходимая для разрушения зерна в условиях, более близких к реальному процессу, во многом зависит от материала связки и глубины его залегания в ней [13]. С увеличением пластичности связки и глубины залегания зерен она возрастает и может в 1,5-3 раза превышать величину силы Рсж. полученную при стандартных статических испытаниях зерен на прочность при одноосном сжатии по ГОСТ 9206-70. В условиях шлифования по жесткой схеме, когда в контакте пары «алмазные зерна – ПСТМ» находятся чрезвычайно жесткие материалы, часть поперечной подачи должна как бы компенсироваться упругостью связки и величиной заглупления в нее алмазных зерен. С определенными допущениями процесс алмазного шлифования можно сравнить с процессом профилирования алмазных кругов методом пластического деформирования [4], [14], где в качестве притира выступает

предельно жесткий материал (ПСТМ), а шаржируемый материал – металлическая связка (на основе алюминия, бронзы, железа или кобальта). При этом, как показали работы, выполненные в научной школе П. И. Ящерицына, даже алмазные зерна относительно небольших размеров и прочности (например, марки АС6 зернистостью 63/40) могут быть полностью вдавлены даже в металлическую связку круга без их разрушения [14].

Это дает основание утверждать, что под действием высоких нормальных нагрузок происходит вдавливание зерен в органическую связку круга, которая имеет значительно меньшую твердость, чем обрабатываемый поликристалл. Вполне естественно предположить, что при этом локально будет увеличиваться концентрация алмазных зерен в зоне контакта РПК с ПСТМ. Это является еще одной важной особенностью рассматриваемого процесса.

Анализируя данные, представленные на рис. 3, процесс самозатачивания предварительно вскрытого круга при работе по «жесткой» схеме можно представить следующим образом. В начальный момент, когда зерна предварительно вскрытого круга значительно выступают над уровнем связки и имеют острые микро- и субмикромки, происходит сьем ПСТМ и износ (самозатачивание) зерен при относительно малых значениях составляющих силы резания ($\tau \leq 30$ с, $P_y = 225$ Н, $P_z = 20$ Н). По мере уменьшения высоты зерен растет их число в контакте и величина образующихся на них площадок износа. Поэтому процесс съема ПСТМ и износа круга затухает, что ведет к быстрому росту нормальной составляющей силы резания P_y , а следовательно, давления в контакте P_n и силы трения, вызывающей рост тангенциальной составляющей силы P_z . При достижении силой P_y определенной величины может произойти вдавливание зерен в связку без их заметного разрушения. Как только это произойдет с зернами круга, находящимися в контакте с обрабатываемым ПСТМ, зерна, входящие в контакт (их вершины выступают над вершинами зерен, находящихся в контакте), будут работать одновременно на сжатие и изгиб. Поскольку предел их прочности на изгиб примерно на порядок меньше, чем на сжатие, то при высокоскоростном контактно-взаимодействии зерен с обрабатываемым ПСТМ начнется процесс их интенсивного микроразрушения (самозатачивания) с образованием острых микро- и субмикроромок. В результате происходит всплеск силы P_z , что свидетельствует о возобновлении съема припуска с ПСТМ. Как видно из рисунка 3, всплеск выходных показателей обработки имеет некоторую продолжительность во времени ($\tau \approx 5-40$ с). Этому способствует, по-видимому, три основных фактора: первый заключается в том, что начавшийся мгновенно процесс самозатачивания зерен в силу своей динамичности может продолжаться и при величине усилия P_y , несколько меньшей, чем та, при которой он начался; второй состоит в том, что после вдавливания зерен в связку и выхода их из контакта с ПСТМ происходит

увеличение высоты выступления зерен на некоторую величину из-за упругого восстановления связки. В результате этого зерна будут входить в контакт с ударом и воспринимать изгибающие нагрузки; в-третьих, предполагается, что за время всплеска происходит дополнительное вдавливание зерен в связку за счет осуществления подачи образца на круг механизмом поперечной подачи станка, что также способствует интенсификации процесса самозатачивания зерен.

Так как суммарная величина линейного съема ПСТМ и износа круга за время всплеска превышает величину подачи на круг за это же время механизмом поперечной подачи, то сила P_y несколько падает из-за уменьшения натяга в технологической системе. Это приводит к прекращению процесса вдавливания зерен в связку, а, следовательно, их самозатачивания. В результате этого сила P_y вновь начинает расти. Однако, поскольку с уменьшением высоты выступления зерен (по мере их износа) над уровнем связки круга увеличивается их количество в контакте с ПСТМ в силу разновысотности зерен, то очередное вдавливание зерен в связку произойдет уже при большем значении силы P_y . Этому способствует также тот факт, что по мере вдавливания зерен в связку происходит увеличение концентрации алмазов в круге в сравнении с исходным значением, что само по себе делает алмазоносный слой жестче и затрудняет процесс вдавливания. Поэтому следующее вдавливание произойдет при еще большем значении силы P_y и т.д. До наступления установившейся периодичности процесса износа круга таких всплесков (местного значения) может быть несколько. Например, для условий, представленных на рис. 3 их три.

Рост составляющих сил резания прекращается по достижении своего максимального для данных условий значения ($P_y=1060$ Н, $P_z=160$ Н, $\tau=250$ с), после того, как в контакт с ПСТМ войдет связка. В этом случае периодичность всех параметров (износ круга, съем ПСТМ, силы резания и др.) устанавливается, т.е. происходят чередующиеся через определенный период времени (в конкретном случае $\tau \approx 80$ с) периодические всплески и затухания значений выходных показателей обработки. В это время периодичность процесса обусловлена в основном только тем, что суммарная величина съема ПСТМ и износа круга в момент самозатачивания последнего уменьшает величину подачи образца на круг, в результате чего происходит уменьшение натяга в технологической системе, а, следовательно, и нормальной силы резания ($P_{y.min} \approx 875$ Н), что, в свою очередь, приводит к прекращению процесса самозатачивания зерен, а следовательно, съема ПСТМ. Этот процесс возобновляется при достижении нормальной силой своего максимального для данных условий значения ($P_y \max=1060$ Н, $P_z \max=60$ Н), когда ОМ вновь внедряется в связку, одновременно вдавливая в нее зерна, которые снова начинают работать на изгиб, и т.д. Учитывая высокую интенсивность износа круга (≥ 200 мкм/мин), можно предположить,

что обрабатываемый ПСТМ в момент внедрения в алмазонасный слой является как бы резцом по отношению к кругу, удаляя с его рабочей поверхности зерна и связку, способствуя, таким образом, его самозатачиванию.

Минимальные значения сил P_y и P_z в значительной степени зависят от величины поперечной подачи, компенсирующей уменьшение натяга в технологической системе. Специальные эксперименты, проведенные с выключением поперечной подачи в момент начала самозатачивания круга, показали, что в таких условиях сила еще несколько снижается, после чего происходит ее стабилизация (рис. 4).

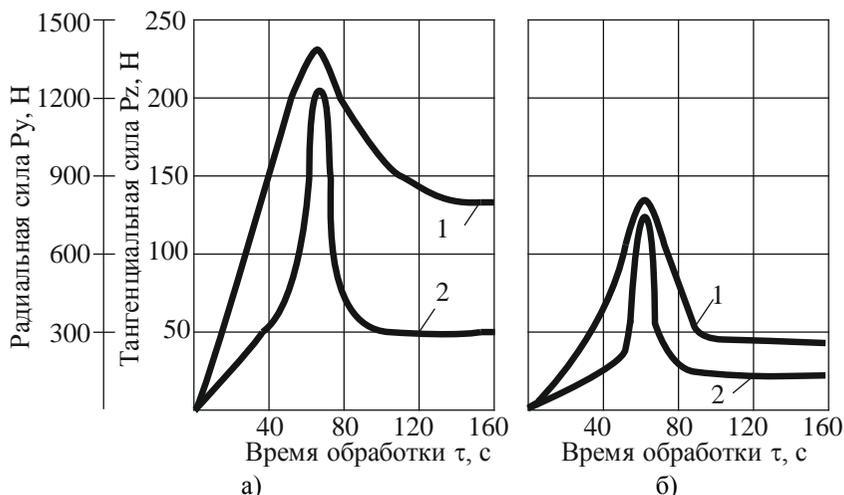


Рисунок 4 – Осциллограммы, отражающие влияние марки ПСТМ и времени обработки на составляющие силы резания P_z (1) и P_y (2)
а) - СПА; б) - ПТНБ

Условия обработки: круг 12A2-45°150x10x2x32 AC4 125/100 Б156 100%
 $V_k=20$ м/с, $S_{пр}=1$ м/мин, СОТС–3% - й раствор Na_2CO_3 в воде

Прекращение дальнейшего снижения силы P_y на достаточно высоком уровне ($P_y \approx 300$ Н для СПА марки СКМ-Р (а) и $P_y \approx 100$ Н для ПТНБ гексанит-Р (б), а также значительное снижение силы P_z , которая вызвана в этих условиях в основном силой трения пары «ПСТМ - алмазные зерна», свидетельствуют о быстром прекращении процессов съема припуска с ОМ и износа круга. Отметим, что значительная разница пиковых (максимальных) значений сил P_y и P_z для ОМ на основе СПА и ПТНБ вызвана не только их различной твердостью, но и неодинаковыми значениями площадей контакта с кругом (по причине неодинаковых диаметров заготовок).

Наличие контакта СПА со связкой подтверждается электронномикроскопическими исследованиями состояния РПК как после шлифования ПСТМ в условиях стабильной периодичности изменения физических и технологических показателей, так и после останова вращения круга с одновременным выключением поперечной подачи в момент самозатачивания.

В последнем случае установлено, что уровень связки, находящейся под поликристаллом, ниже уровня связки, еще не вошедшей в контакт с ним, примерно на величину 4-10 мкм. Установлено также, что режущий рельеф круга характеризуется высокой степенью сглаженности, незначительная высота выступания зерен над уровнем связки $H = 3-8$ мкм обусловлена, по-видимому, только лишь упругим восстановлением связки.

Имеется значительное количество лунок от выпавших зерен ($\approx 20-50\%$). Анализ характера износа зерен показывает, что подавляющая их часть имеет поверхность, образованную в результате разрушения с последующим интенсивным ее выглаживанием в результате высокосилового и высокотемпературного взаимодействия с поверхностью ОМ. Отсутствие на большинстве зерен ($\approx 75\%$) макро- и микротрещин может служить, по-видимому, подтверждением тому, что основной причиной их самозатачивания является тангенциальная составляющая силы резания P_z .

Считается [3], что алмазное шлифование ПСТМ кругами на металлических связках неэффективно из-за невозможности самозатачивания. Однако анализ полученных выше данных позволяет предположить, что самозатачивание круга на металлической связке возможно, но должно отличаться уровнем силовой напряженности процесса. Это связано с такими показателями свойств связок, как прочность и повышенная способность алмазоудержания. В результате этого увеличивается сопротивление вдавливанию зерен. Этому могут способствовать такие факторы как рост количества алмазных зерен в контакте с ПСТМ (за счет уменьшения числа выпавших зерен), а также склонность металлических связок к наклепу. Электронномикроскопические исследования показали, что наблюдаемая периодичность изменения выходных показателей процесса шлифования кругами на металлических связках имеет такую же природу, как и в случае использования кругов на органических связках. Однако реализуется она при больших значениях давления в контакте, величина которого может достигать 60 МПа и более. Повышенная прочность связок сказывается и на тангенциальной составляющей силы резания P_z , а, следовательно, и мощности шлифования. Ее эффективное значение может составлять 6 кВт и более.

Выводы и перспективы развития. На основании изложенного выше можно заключить, что алмазные круги на органических связках могут успешно осуществлять шлифование ПСТМ в режиме самозатачивания без

дополнительной правки до полного износа алмазоносного слоя. Однако такой процесс является высокосиловым. Механизм самозатачивания алмазоносного слоя круга предопределяется вдавливанием ПСТМ в связку, в результате чего алмазные зерна начинают испытывать значительные по величине изгибающие и растягивающие нагрузки. Учитывая, что предел прочности алмаза на изгиб и растяжение на порядок меньше, чем на сжатие, это обуславливает интенсивное самозатачивание алмазных зерен с образованием на них острых микро- и субмикроромок. Это и обеспечивает резкую интенсификацию съема припуска с ПСТМ. Процесс самозатачивания РПК происходит периодически, затухая и возобновляясь вновь, что свидетельствует о наличии резерва для повышения эффективности процесса шлифования. Алмазные круги на металлических связках также могут работать в режиме самозатачивания, однако силовая напряженность процесса еще более велика.

В дальнейшем представляет определенный интерес вопрос практической реализации потенциальных резервов процесса шлифования ПСТМ на базе выявленного механизма самозатачивания алмазных кругов на органических связках.

Список использованных источников: 1. Новиков Н. В. Сопротивление разрушению сверхтвердых композиционных материалов / Новиков Н.В., Майстренко А.Л., Кулаковский В.Н. – К.: Наук. думка, 1993. – 220 с. 2. Пыжов И. Н. Состояние вопроса и перспективы применения алмазов, полученных методом CVD / И. Н. Пыжов, А. В. Васильев, В. Г. Клименко // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб.–Харьков: 2011. – Вып.80. – С. 226-235. 3. Семко М. Ф. Алмазное шлифование синтетических сверхтвердых материалов / М. Ф. Семко, А. И. Грабченко, М. Г. Ходоревский. – Харьков: Вища школа, 1980. – 192 с. 4. Грабченко А. И. 3D процессы алмазно-абразивной обработки. Монография / А. И. Грабченко, В. А. Федорович. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2008. – 345 с. 5. Основы алмазного шлифования / М. Ф. Семко, А. И. Грабченко, А. Ф. Раб [и др.] – Киев: Техника, 1978. – 192 с. 6. Мишинаевский Л. Л. Износ шлифовальных кругов / Мишинаевский Л. Л. – Киев: Наук, думка, 1982. – 192 с. 7. О механизме износа алмазных кругов / С. А. Попов, Г. К. Грановский, Н. П. Малевский [и др.] // Алмазы. – 1970. – Вып. 2. – С. 17-22. 8. Попов С. А. Алмазно-абразивная обработка металлов и твердых сплавов / С. А. Попов, Н. П. Малевский, Л. М. Терещенко – М.: Машиностроение, 1977. – 263 с. 9. Сагарда А. А. Алмазно-абразивная обработка деталей машин / А. А. Сагарда, И. Х. Чеповецкий, Л. Л. Мишинаевский – Киев: Техніка, 1974. – 180 с. 10. Семко М. Ф. Влияние связки на работу алмазных кругов / М. Ф. Семко, А. И. Грабченко, М. Д. Узунян // Машиностроение. – 1965. – № 5. – С.8-10. 11. Синьковский Л. К. Методика оценки режущих свойств алмазных шлифовальных кругов / Л. К. Синьковский, Н. Э. Шишков, Р. В. Симонян // Сб. тр. ВНИИАлмаза: Повышение работоспособности алмазного инструмента. – М.: НИИмаш, 1980. – С. 25-28. 12. Захаренко И. П. Алмазные инструменты и процессы обработки / И. П. Захаренко – Киев: Техника, 1980. – 215 с. 13. Третьяков И. П. Устройство для определения механической прочности алмазно-абразивных зерен / И. П. Третьяков, Р. А. Абидов // Алмазы. – 1968. – Вып. 3. – С. 10-12. 14. Яцерицын П. И. Профилирование алмазно-абразивных инструментов пластическим деформированием / П. И. Яцерицын, В. Д. Дорофеев, Г. Н. Гринин. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1982. – 112 с.

Bibliography (transliterated): 1. Novikov N.V., Majstrenko A.L., Kulakovskij V.N. Soprotivlenie razrusheniju sverhtverdyh kompozicionnyh materialov – K.: Nauk. dumka, 1993. – 220 s. 2. Pyzhov I.N., Vasil'ev A.V., Klimenko V.G. Sostojanie voprosa i perspektivy primenenija almazov,

poluchennyh metodom CVD / Rezanie i instrument v tehnologicheskikh sistemah: Mezhdunar. nauch.-tehn. sb. – Har'kov: 2011. – Vyp.80. – S. 226-235. 3. Semko M.F., Grabchenko A.I., Hodorevskij M.G. Almaznoe shlifovanie sinteticheskikh sverhtverdyh materialov. – Har'kov: Vishha shkola, 1980. – 192 s. 4. Grabchenko A.I., Fedorovich V.A. 3D processy almazno-abrazivnoj obrabotki. Monografija. – Har'kov: NTU «HPI», 2008. – 345 s. 5. Osnovy almaznogo shlifovaniya / M.F. Semko, A.I. Grabchenko, A.F. Rab [i dr.] – Kiev: Tehnika, 1978. – 192 s. [6]. Mishnaevskij L. L. Iznos shlifoval'nyh krugov. – Kiev: Nauk, dumka, 1982. – 192 s. 7. O mehanizme iznosa almaznyh krugov / S. A. Popov, G. K. Granovskij, N. P. Malevskij [i dr.] / Almazy. – 1970. – Vyp. 2. – S. 17–22. 8. Popov S.A., Malevskij N.P., Tereshhenko L.M. Almazno-abrazivnaja obrabotka metallov i tverdyh splavov. – M.: Mashinostroenie, 1977. – 263 s. 9. Sagarda A.A., Chepoveckij I.H., Mishnaevskij L.L. Almazno-abrazivnaja obrabotka detalej mashin – Kiev: Tehnika, 1974. – 180 s. 10. Semko M.F., Grabchenko A.I., Uzunjan M.D. Vlijanie svjazki na rabotu almaznyh krugov / Mashinostroenie. – 1965. – № 5. – S.8–10. 11. Sin'kovskij L.K., Shishkov N.Je., Simonjan R.V. Metodika ocenki rezhushhhij svoystv almaznyh shlifoval'nyh krugov / Sb. tr. VNIImalmaz: Povyshenie rabotosposobnosti almaznogo instrumenta. – M.: NIImash, 1980. – S. 25-28. 12. Zaharenko I. P. Almaznye instrumenty i processy obrabotki. – Kiev: Tehnika, 1980. – 215 s. 13. Tret'jakov I.P., Abidov P.A. Ustrojstvo dlja opredelenija mehanicheskoy prochnosti almazno-abrazivnyh zeren / Almazy. – 1968. – Vyp. 3. –S. 10-12. 14. Jashhericyn P.I., Dorofeev V.D., Grinin G.N. Profilirovanie almazno-abrazivnyh instrumentov plasticheskim deformirovanem. – Saratov: Izd-vo Sarat. un-ta, 1982. – 112 s.

И. Н. Пыжов, д-р техн. наук, В. А. Федорович, д-р техн. наук,
И. В. Волошкина, Харьков, Украина

СИЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССА ШЛИФОВАНИЯ ПСТМ В РЕЖИМЕ САМОЗАТАЧИВАНИЯ АЛМАЗНЫХ КРУГОВ

Розглянуто питання, пов'язані з особливостями процесу шліфування полікристалічних надтвердих матеріалів алмазними кругами на органічних зв'язках в режимі самозаточування. Показано визначальну роль силового фактора в цьому процесі. Визначено ступінь впливу основних факторів, що визначають умови обробки, на складові сили різання, номінальний тиск в контакті і ефективну потужність шліфування. Встановлено особлива роль поперечної подачі з точки зору стабілізації процесу самозаточування алмазних кругів на органічних зв'язках.

Ключові слова: полікристалічні надтверді матеріали, алмазний круг, алмазоносний шар круга, ріжучий рельєф круга, органічна зв'язка, самозаточування круга, нормальна і тангенціальна складові сили різання, тиск в зоні контакту, ефективна потужність шліфування, періодичність процесу шліфування

Рассмотрены вопросы, связанные с особенностями процесса шлифования поликристаллических сверхтвердых материалов алмазными кругами на органических связках в режиме самозаточивания. Показана определяющая роль силового фактора в этом процессе. Определена степень влияния основных факторов, определяющих условия обработки, на составляющие силы резания, номинальное давление в контакте и эффективную мощность шлифования. Установлена особая роль поперечной подачи с точки зрения стабилизации процесса самозаточивания алмазных кругов на органических связках.

Ключевые слова: поликристаллические сверхтвердые материалы, алмазный круг, алмазоносный слой круга, режущий рельеф круга, органическая связка, самозаточивание круга, нормальная и тангенциальная составляющие силы резания, давление в зоне контакта, эффективная мощность шлифования, периодичность процесса шлифования

Questions related to the features of the grinding process of polycrystalline superhard materials by diamond wheels on organic bonds in the self-sharpening mode are considered. The determining role of the force factor in this process is shown. The degree of influence of the main factors determining the processing conditions on the components of the cutting force, the nominal contact pressure and the effective grinding power are determined. A special role of transverse feeding has been established from the point of view of stabilization of the process of self-sharpening of diamond wheels on organic bonds.

Keywords: polycrystalline superhard materials, diamond wheel, diamond-bearing layer of the wheel, cutting wheel relief, organic bond, self-sharpening of the wheel, normal and tangential components of cutting force, pressure in contact zone, effective grinding power, periodicity of grinding process

1. Постановка проблеми. Унікальні фізико-механічні властивості полікристалічних сверхтвердих матеріалів (ПСТМ) к которым в первую очередь относятся синтетические поликристаллические алмазы (СПА) и плотные модификации нитрида бора (ПТНБ) позволили им сразу же найти возможность широкого использования во многих областях народного хозяйства [1-3]. Одним из наиболее распространенных методов

формообразования изделий (в том числе и режущих инструментов) из таких обрабатываемых материалов (ОМ) является алмазное шлифование кругами на органических связках [1]. Установлено, что такие круги могут работать в режиме самозатачивания, однако механизм их самозатачивания при обработке ПСТМ имеет ряд особенностей [4].

Исследования показали, что процесс шлифования ПСТМ в режиме самозатачивания кругов на органических связках является высокосиловым. Это во многих случаях может негативно отразиться на качестве изделий, изготавливаемых из ПСТМ с использованием такого метода шлифования. Однако на сегодняшний день отсутствуют данные о возможности управления силовыми характеристиками процесса шлифования путем изменения условий обработки.

2. Анализ последних исследований и публикаций. Как было установлено предыдущими исследованиями [4], алмазные круги на органических связках могут успешно осуществлять шлифование ПСТМ в режиме самозатачивания без дополнительной правки до полного износа алмазоносного слоя. Экспериментально доказано, что такой процесс является высокосиловым поскольку механизм самозатачивания алмазоносного слоя круга предопределяется вдавливанием ПСТМ в связку, в результате чего алмазные зерна начинают испытывать значительные по величине изгибающие и растягивающие нагрузки. Учитывая, что предел прочности алмаза на изгиб и растяжение на порядок меньше, чем на сжатие, это обуславливает интенсивное самозатачивание алмазных зерен с образованием на них острых микро - и субмикроромок. Это и обеспечивает резкую интенсификацию съема припуска с ПСТМ. Впервые установлено [4], что процесс самозатачивания круга происходит периодически, затухая и возобновляясь вновь, что свидетельствует о наличии резерва для повышения эффективности процесса шлифования.

Представленная работа посвящена совершенствованию процесса обработки ПСТМ алмазными кругами на органических связках за счет выявления его физических и технологических особенностей.

3. Цель исследования. Установление влияния условий обработки на силовые характеристики процесса шлифования ПСТМ в режиме самозатачивания алмазных кругов на органических связках и выявление на этой основе резервов повышения его эффективности.

4. Основные материалы исследования.

Высокие нагрузки в зоне контакта ПСТМ с алмазным кругом, которыми характеризуется процесс самозатачивания его алмазоносного слоя, могут оказывать неблагоприятное влияние на качество изделий из ПСТМ (растрескивание ОМ, сколы на режущих кромках и т.д.). Поскольку обработка ПСТМ в настоящее время производится на обычных заточных и шлифовальных станках, которые, как правило, не предназначены для работы

в таких условиях, то это может привести к потере ими точности, и даже преждевременному выходу их из строя. Потеря станками точности в сочетании с большими деформациями в технологической системе, а также скачкообразность съема припуска с ОМ зачастую не позволяет получить требуемую точность при изготовлении изделий (в том числе и режущих инструментов) из ПСТМ. В связи с этим приобретает определенную актуальность задача установления возможности уменьшения сил и давления в контакте РПК с ПНТМ путем изменения режима обработки и характеристики кругов.

Влияние условий обработки, на силы резания и давление в контакте. Предыдущие исследования [4] показали, что уровень составляющих силы резания P_u и P_z при обработке СПА значительно выше, чем при обработке ПТНБ. Здесь интересно отметить, что влияние твердости ОМ корректно исследовать только в пределах одной группы ПСТМ (СПА или ПТНБ).

Площадь контакта ОМ с РПК оказывает значительное влияние на силы резания, поскольку она определяет число алмазных зерен в контакте с ПСТМ. Установлено, что на значение нормальной составляющей силы резания существенное влияние оказывает площадь контакта ПСТМ с РПК. Это вполне закономерно, поскольку круг самозатачивается при строго определенном значении давления в контакте. Этим объясняется повышенная трудоемкость обработки торцов двухслойных пластин из ПСТМ по сравнению со шлифованием боковых поверхностей. Поскольку в настоящее время намечается тенденция к еще большему увеличению размеров пластин, эта проблема еще более усугубится, так как на обычном оборудовании их обработка кругами в режиме самозатачивания будет сопряжена с повышенными трудностями.

Одним из путей снижения составляющих силы резания в таких условиях является применение алмазных кругов с малыми ширинами рабочей поверхности, что позволяет уменьшить величину площади контакта при шлифовании пластин больших размеров. Однако в этом случае должна быть решена задача повышения жесткости самого алмазного круга, хотя и это не позволяет полностью решить проблему, так как резко интенсифицируется линейный износ круга, что ведет к снижению точности изделий из ПСТМ.

Заметное влияние на силовую напряженность процесса должна оказывать характеристика круга (зернистость, концентрация, связка, марка алмазных зерен) так как с их изменением меняются размеры зерен, их количество на рабочей поверхности круга, а также прочностные свойства зерен и связки. Последнее обстоятельство заслуживает особого внимания, так как именно связка оказывает сопротивление вдавливанию в нее зерен и поликристалла. Так, например, металлоорганическая связка Т02, имеющая в своем составе в качестве наполнителя медный порошок, менее твердая, чем связка Б1 (наполнитель – карбид бора), обеспечивает несколько меньшее

значение R_n (примерно на 12,5%). В то же время связка T02 менее хрупкая, что вызывает рост составляющей силы резания P_z примерно на 15% за счет увеличения предела прочности на изгиб [1]. Следует отметить, что из всех серийно выпускаемых органических связок связка T02 обеспечивает наименьшее значение давления в контакте. Поэтому она и была принята за основу для дальнейших исследований.

Снижение концентрации алмазов круга, приводящее к уменьшению числа зерен на его рабочей поверхности, а, следовательно, и в контакте с ПСТМ, несомненно, должно приводить к уменьшению значений давления в контакте и составляющих силы резания (в дальнейшем речь идет о максимальных их значениях). Это подтверждается экспериментально (рис. 1). Снижение концентрации со 150 до 50% при шлифовании СПА обеспечивает уменьшение нормальной силы и давления в контакте примерно в 1,7 раза, а силы P_z и мощности $Nэ$ в 1,8 раза. Последнее обстоятельство объясняется тем, что предел прочности зерен на изгиб примерно в 2 раза выше, чем у связки.

Незначительное повышение прочности зерен с увеличением их размеров при существенном уменьшении их количества в контакте с ПСТМ может служить, по-видимому, объяснением факта снижения R_n и R_y с увеличением зернистости алмазного круга. Как видно из рисунка 2 в диапазоне размеров зерен 50/40-200/160 значения R_n и R_y уменьшаются в 1,2 раза. В то же время сила P_z , а также мощность шлифования примерно во столько же увеличиваются. Интересно отметить, что периодичность показателей при $Z=50/40$ практически отсутствует, т.е. процесс идет стабильно.

С ростом скорости шлифовального круга силовая напряженность процесса обработки несколько снижается (рис. 3). Так, например, нормальная сила (давление в контакте) уменьшаются до 1,4 раз, а тангенциальная сила (мощность шлифования) до 1,5 раз. Объяснить этот факт можно тем, что с ростом скорости улучшаются динамические условия процесса, что способствует более интенсивному самозатачиванию алмазных зерен круга.

Наличие периодичности процесса самозатачивания алмазных кругов [4] при шлифовании ПСТМ позволяет сделать вывод о невозможности снижения силовой напряженности путем уменьшения величины поперечной подачи. В этом случае по мере роста поперечной подачи должно наблюдаться лишь увеличение минимальных значений выходных показателей, характеризующих силовую напряженность процесса которые будут постепенно стремиться к пиковым (максимальным) их значениям вплоть до стабилизации процесса самозатачивания алмазного круга.

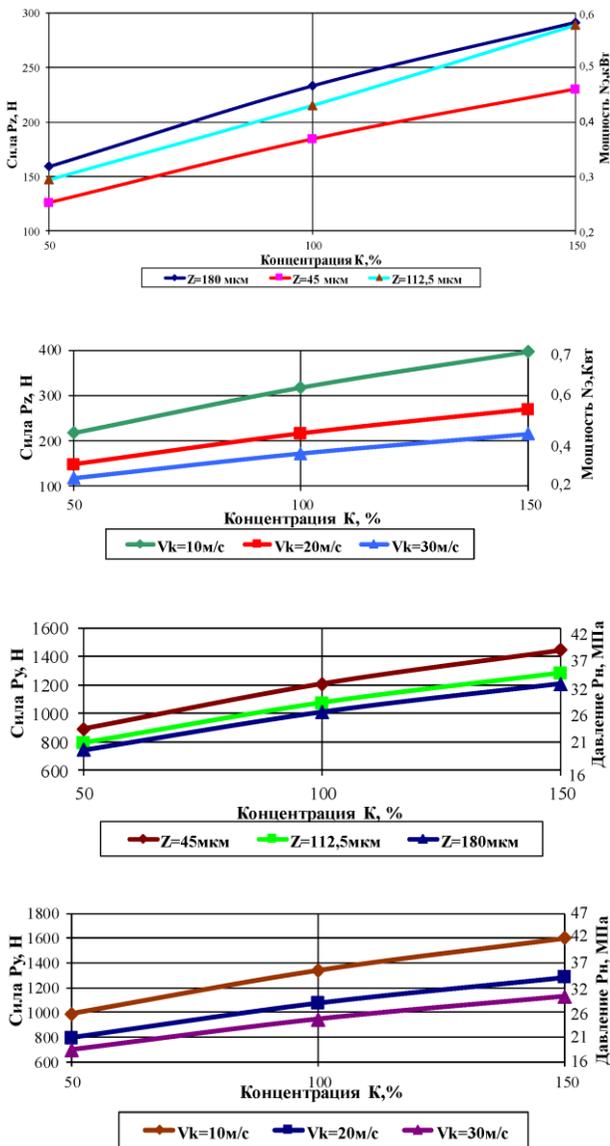


Рисунок 1 – Влияние концентрации алмазного круга на P_y , P_n , P_z и N_z
 Общие условия обработки: круг 12A2-45°150x10x2x32 AC4 125/100 TO2 100%
 $V_k=20 \text{ м/с}$, $\text{Spr.}=1 \text{ м/мин}$, $\text{СОТС}-3\%$ -й раствор Na_2CO_3 в воде

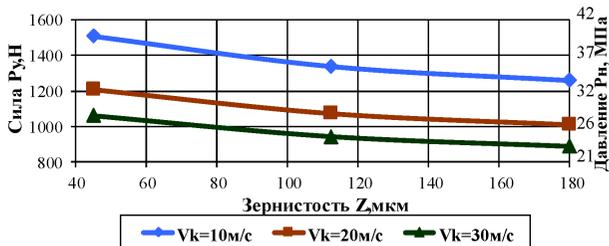
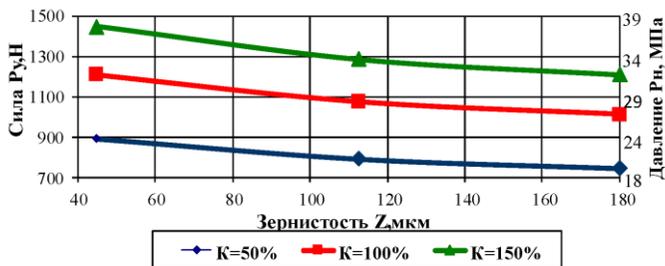
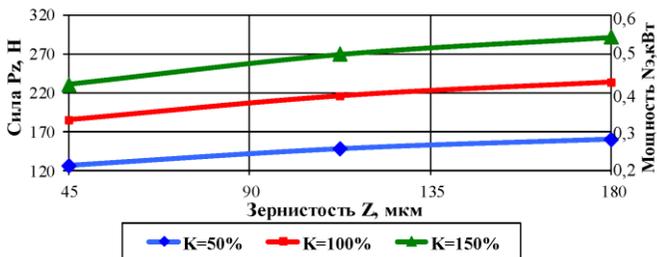
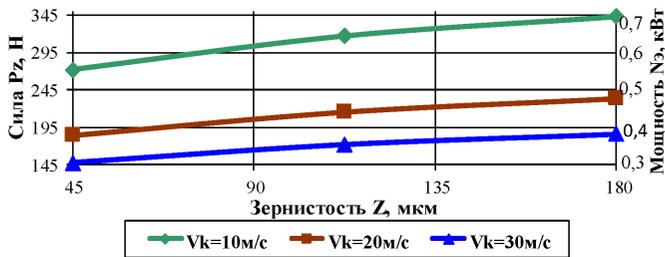


Рисунок 2 – Влияние зернистости алмазного круга на P_y , P_n , P_z и N_z
 Общие условия обработки: круг 12A2-45°150x10x2x32 AC4 125/100 TO2 100%
 $V_k=20$ м/с, $S_{пр}=1$ м/мин, СОТС–3%-й раствор Na_2CO_3 в воде

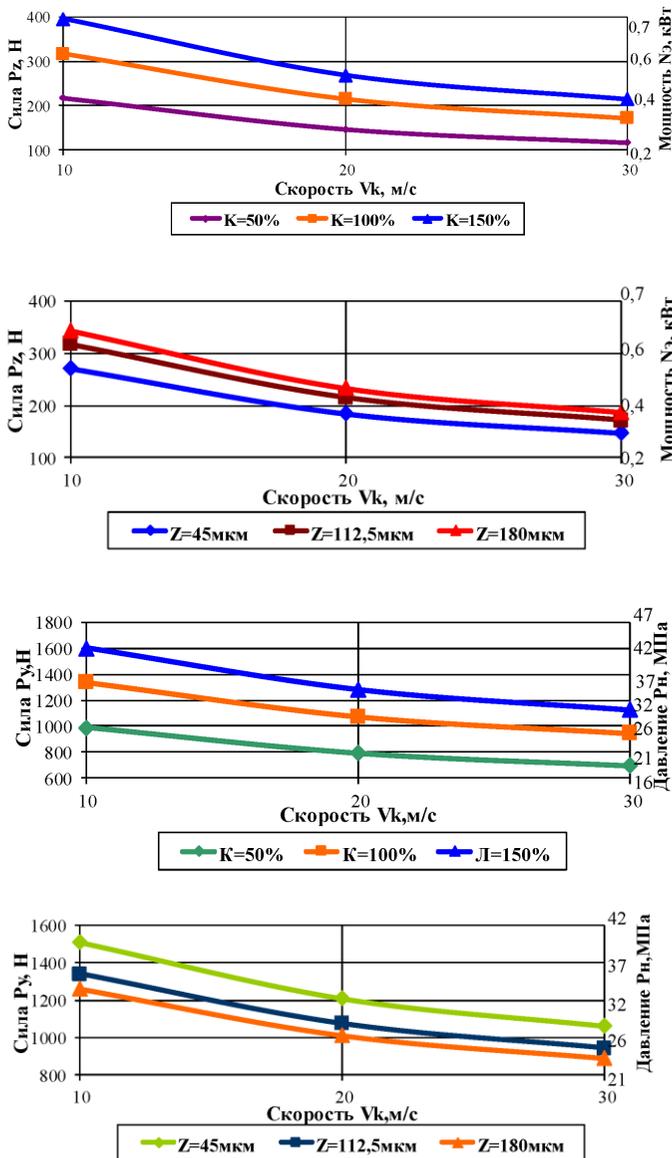


Рисунок 3 – Влияние скорости алмазного круга на P_y , P_n , P_z и N_z
 Общие условия обработки: круг 12A2-45°150x10x2x32 AC4 125/100 TO2 100%
 $V_k=20$ м/с, $S_{пр}=1$ м/мин, СОТС–3%-й раствор Na_2CO_3 в воде

Минимальные значения давления контакте ($P_n=15,9$ МПа) можно получить при следующих значениях исследуемых параметров: $K=50\%$; $Z=200/160$; $V_k = 40$ м/с.

Таким образом, проведенные выше исследования позволяют заключить, что использование алмазных кругов на органических связках для шлифования ПСТМ в режиме самозатачивания неизбежно связано со значительным уровнем силовой напряженности процесса обработки. Решить эту задачу путем изменения режимов обработки и характеристики круга для существующих марок органических связок не представляется возможным. Теоретически возможно создание связок, которые будут самозатачиваться при требуемых уровнях давления в контакте. Однако это практически неизбежно будет сопровождаться повышенным удельным расходом алмазных кругов.

Роль поперечной подачи для стабилизации процесса самозатачивания алмазного слоя кругов на органических связках. Периодичность изменения физических и технологических показателей процесса алмазного шлифования ПСТМ [4] свидетельствует о несоответствии величины поперечной подачи суммарному значению съема ПСТМ и износа круга, а, следовательно, о недостаточно полном использовании потенциальной режущей способности кругов. Другими словами, наличие периодичности свидетельствует о некоем резерве повышения производительности без увеличения максимального уровня силовой напряженности процесса.

Как уже отмечалось, причиной падения значений выходных показателей после начала их всплеска является несоответствие величины S_{non} суммарной величине съема ПСТМ и износа круга. А это ведет к уменьшению натяга в технологической системе, а, следовательно, и нормальной составляющей силы, в результате чего самозатачивание круга прекращается. Поскольку максимальные (пиковые) значения сил, давления в контакте и других показателей в некотором диапазоне изменения S_{non} не зависят от ее величины, то, увеличивая S_{non} , можно регулировать момент прекращения падения значений выходных показателей без изменения их максимальных значений и при определенной величине S_{non} стабилизировать процесс.

Как видно из рис. 4, при $S_{non}=0,02$ мм/дв. ход период следования всплесков и их амплитуда уменьшаются по сравнению с $S_{non}=0,01$ мм/дв. ход. Однако происходит это за счет роста их минимальных значений при неизменной пиковой величине. При $S_{non}=0,04$ мм/дв. ход процесс шлифования стабилизируется. Таким образом, без увеличения максимальных значений давления в контакте и мощности шлифования производительность (для данных условий обработки) существенно возрастает. Этот процесс сопровождается уменьшением удельного расхода алмазов круга примерно в 1,6 раза, что значительно повышает эффективность процесса шлифования.

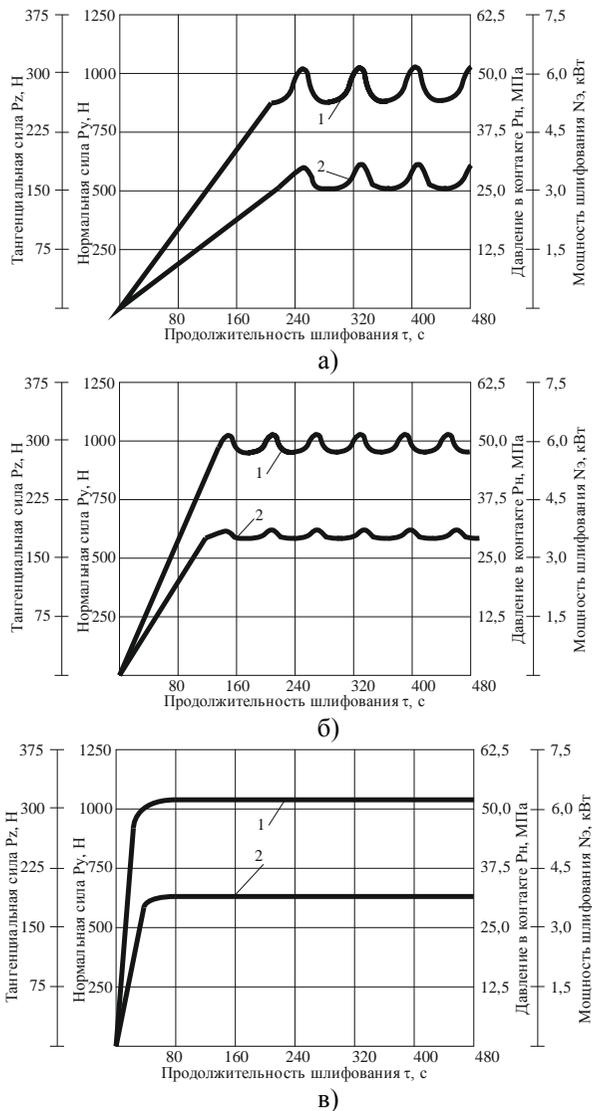


Рисунок 4 – Влияние поперечной подачи на выходные показатели обработки
1 – P_y (P_n); 2 – P_z (N_z)

а)- $S_{поп.}=0,01$ мм/дв. ход; б)- $S_{поп.}=0,02$ мм/дв. ход; в)- $S_{поп.}=0,035$ мм/дв. ход

Условия обработки: круг 12A2-45°150x10x2x32 AC4 125/100 B2-01 100%

$V_k=20$ м/с, $S_{пр.}=1$ м/мин, СОТС-3%-й раствор Na_2CO_3 в воде

Обрабатываемый материал – СПА марки АСБ [1] $Sk \approx 20$ мм²

Эксперименты показали, что это единственный эффективный в данных условиях путь, позволяющий повысить производительность обработки путем стабилизации процесса. Такие параметры периодичности, как величина периода и амплитуда всплесков, несут в себе информацию о потенциальных возможностях данного круга. Чем выше их значения, тем большую производительность может обеспечить он без увеличения максимальных величин давления в контакте и мощности шлифования.

Экспериментально установлено, что величину поперечной подачи, при которой исключается периодичность изменения физических и технологических показателей обработки, приближенно можно рассчитывать по эмпирической зависимости [5]:

$$S_{non.} = \frac{30}{H_{ПСТМ}^3 \cdot S_k \cdot HRB},$$

где $S_{non.}$ – поперечная подача, мм/дв. ход; $H_{ПСТМ}$ – микротвердость ПСТМ, ГПа; S_k – площадь контакта ПСТМ с РПК, м²; HRB – условная твердость связки круга.

Формула справедлива в следующих диапазонах условий обработки: $V_k=20-40$ м/с; $Z=125/100-200/160$; $K=50-100\%$.

Рассчитанные по формуле оптимальные значения $S_{non.}$ (при которых процесс шлифования стабилизируется) для некоторых марок связок кругов и ПСТМ представлены в табл.

Таблица – Расчетные значения $S_{non.}$ для различных марок связок кругов и ПСТМ

Связка круга	Обрабатываемый ПСТМ				
	АСБ	СКМ	АСПК	Гексанит-Р	Композит 05
Б1	0,035	0,03	0,035	0,07	0,11
Т02	0,04	0,035	0,04	0,09	0,12

Аналогичная картина наблюдается и при шлифовании СТМ на основе нитрида бора. Например, при обработке гексанита-Р процесс также стабилизируется при расчетной величине подачи, что позволило повысить производительность шлифования с 13 до 79 мм³/мин, т.е. почти в 6 раз. Дальнейшее увеличение $S_{non.}$ нежелательно по причине резкого роста давления в контакте, мощности шлифования и температуры в зоне обработки, что в конечном итоге может увеличить брак изделий из ПСТМ.

Таким образом, для практического использования следует рекомендовать условия обработки, обеспечивающие минимальные значения давления в контакте для которых величину поперечной подачи необходимо рассчитывать по приведенной выше зависимости. Это позволяет наиболее оптимальным образом использовать алмазные круги на органических связках для шлифования ПСТМ.

Выводы и перспективы развития. 1. Таким образом, проведенные исследования позволяют заключить, что использование алмазных кругов на органических связках для шлифования ПСТМ в режиме самозатачивания неизбежно связано со значительным уровнем силовой напряженности процесса обработки. 2. Решить задачу снижения сил путем изменения режимов обработки и характеристики круга для существующих марок органических связок не представляется возможным. Теоретически возможно создание связок, которые будут самозатачиваться при требуемых уровнях давления в контакте. Однако это практически неизбежно будет сопровождаться повышенным удельным расходом алмазных кругов. 3. Установлена особая роль поперечной подачи при шлифовании ПСТМ в режиме самозатачивания алмазных кругов на органических связках. Она состоит в том, что без увеличения максимальных значений давления в контакте и мощности шлифования увеличением подачи можно стабилизировать процесс самозатачивания круга и тем самым существенно повысить производительность процесс обработки ПСТМ. Одновременно с этим можно уменьшить удельный расход алмазов круга примерно в 1,6 раза, что значительно повышает эффективность процесса шлифования в целом. 4. Экспериментальные исследования позволили установить эмпирическую зависимость для определения значения поперечной подачи, при которой достигается максимальное значение производительности обработки без увеличения силовых характеристик процесса шлифования.

В дальнейшем представляют определенный интерес исследования по установлению влияния условий обработки на удельный расход алмазов круга, энергоемкость, а также другие физические и технологические показатели процесса шлифования ПСТМ кругами на органических связках в режиме самозатачивания.

Список использованных источников: 1. Семко М. Ф. Алмазное шлифование синтетических сверхтвердых материалов / М. Ф. Семко, А. И. Грабченко, М. Г. Ходоревский. – Харьков: Вища школа, 1980. – 192 с. 2. Новиков Н. В. Сопротивление разрушению сверхтвердых композиционных материалов / Новиков Н.В., Майстренко А.Л., Кулаковский В.Н. – К.: Наук. думка, 1993. – 220 с. 3. Пыжов И. Н. Состояние вопроса и перспективы применения алмазов, полученных методом CVD / И. Н. Пыжов, А. В. Васильев, В. Г. Клименко // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб.–Харьков: 2011. – Вып.80. – С. 226-235. 4. Пыжов И. Н. Особенности самозатачивания алмазных кругов на органических связках при шлифовании ПСТМ / И. Н. Пыжов // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб. – Харьков: 2018. – Вып.88. – С. 179-192. 5. А. с. 1006169 СССР. МПК⁵ В24В 1/00. Способ шлифования / А. И. Грабченко, И. Н. Пыжов (СССР) – № 3387018/25-08; заявл. 29.12.81; опубл. 23.03.83, Бюл. № 11.

Bibliography (transliterated): 1. Semko M.F., Grabchenko A.I., Hodorevskij M.G. Almaznoe shlifovanie sinteticheskikh sverhtverdykh materialov. – Har'kov: Vishha shkola, 1980. – 192 s. 2. Novikov N.V., Majstrenko A.L., Kulakovskij V.N. Soprotivlenie razrusheniju sverhtverdykh kompozicionnykh materialov. – K.: Nauk. dumka, 1993. – 220 s. 3. Pyzhov I.N., Vasil'ev A.V. Klimenko, V.G. Sostojanie voprosa i perspektivy primeneniyaalmazov, poluchennyh metodom CVD / Rezanie i instrument v tehnologicheskikh sistemah: Mezhdunar. nauch.-tehn. sb. – Har'kov: 2011. – Vyp.80. – S.226-235. 4. Pyzhov I. N. Osobennosti samozatachivaniyaalmaznyh krugov na organicheskikh svyazkakh pri shlifovanii PSTM / Rezanie i instrument v tehnologicheskikh sistemah: Mezhdunar. nauch.-tehn. sb. – Har'kov: 2018. – S. 179-192. 5. A. s. 1006169 SSSR. MPK⁵ B24V 1/00. Sposob shlifovanija / A. I. Grabchenko, I. N. Pyzhov (CSSR) – № 3387018/25-08; zajavl. 29.12.81; opubl. 23.03.83, Bjul. № 11.

УДК 621.787.4

Н.В. Рязанова-Хитровская, В.А. Федорович, д-р техн. наук,
И.Н. Пыжов, д-р техн. наук, Харьков, Украина

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ПРОЦЕССА ВЫГЛАЖИВАНИЯ

Стаття присвячена 3D моделювання напружено-деформованого стану зони пайки інструментального матеріалу в корпусі вигладжувача. Вперше для досліджень задіяна широка гама інструментальних матеріалів, які можуть бути використані для практичної реалізації процесів вигладжування різних груп матеріалів.

Ключові слова: процес вигладжування, алмазне вигладжування, вигладжувач, інструментальний матеріал, природний і синтетичний алмази, ельбор-Р, гексанит-Р, напружено-деформований стан, еквівалентні напруження

Статья посвящена 3D моделированию напряженно-деформированного состояния зоны пайки инструментального материала в корпусе выглаживателя. Впервые для исследований задействована широкая гамма инструментальных материалов, которые могут быть использованы для практической реализации процессов выглаживания различных групп материалов.

Ключевые слова: процесс выглаживания, алмазное выглаживание, выглаживатель, инструментальный материал, природный и синтетический алмазы, эльбор-Р, гексанит-Р, напряженно-деформированное состояние, эквивалентные напряжения

The article is devoted to 3D modeling of the stress-strain state of the soldering zone of tool material in the burnishing body. For the first time, a wide range of tool materials is used for research, which can be used for the practical implementation of the burnishing processes of various groups of materials.

Key words: smoothing process, diamond burnishing, burnishing, tool material, natural and synthetic diamonds, elbor-R, hexanite-P, stress-strain state, equivalent stresses

1. Постановка проблемы. Известно, что благодаря использованию выглаживателей, оснащенных поликристаллами сверхтвёрдых материалов на основе плотных модификаций нитрид бора и синтетических алмазов удается обеспечить значительное повышение производительности обработки ответственных поверхностей деталей [1-5]. В основном инструмент для выглаживания изготавливают из алмаза, который имеет существенные преимущества при обработке цветных металлов и сплавов, однако далеко не всегда пригоден для обработки сталей и сплавов с большим содержанием углерода и железа. Это объясняется тем, что алмаз как аллотропная модификация углерода может вступать в химическую реакцию с указанными обрабатываемыми материалами, а, следовательно, подвергаться повышенному износу. В тех случаях, когда необходимо обработать комбинированные заготовки, состоящие из разных материалов (черных и цветных) более предпочтительными являются инструменты из плотных

модификаций нитрида бора. Исключением являются обработка заготовок из алюминий кремниевых сплавов со вставками из специальных чугунов (деталей типа поршень) – здесь эффективнее алмазный инструмент. Отличие алмазных инструментов от инструментов из плотных модификаций нитрида бора состоит и в том, что первые успешно применяются с теми же оснасткой и режимами обработки, с которой работают замененные твердосплавные инструменты (эффективность достигается благодаря повышению стойкости инструмента в десятки и сотни раз), а вторые эффективны, как правило, только при резком повышении скорости обработки. В последнем случае проявляются такие достоинства инструментов из плотных модификаций нитрида бора как инертность к углеродсодержащим материалам и повышенная теплостойкость [5].

2. Анализ последних исследований и публикаций. Силы, возникающие в процессе выглаживания, создают большие контактные давления на его рабочей поверхности, поэтому материал выглаживателя должен обладать большой твердостью, сопротивлению истиранию, высоким пределом прочности, низким коэффициентом трения, большой теплопроводностью и теплоемкостью. Всем этим требованиям в наилучшей степени удовлетворяет алмаз. Указанными свойствами в той или иной степени обладают синтетический корунд, минералокерамика, твердые сплавы и др. [1]. Однако наиболее выгодно выделяются алмаз и плотные модификации нитрид бора.

Одной из важных народнохозяйственных задач является обеспечение целостности инструментального материала в высокотемпературных процессах пайки его в корпусе выглаживателя и самого процесса выглаживания. Анализ литературы показал, что исследования, посвященные вопросам напряженно-деформированного состояния (НДС) зоны спекания выглаживателей, а также разработки и использование компьютерных программ для определения напряжений, практически отсутствуют. Это можно сказать и в отношении использования выглаживателей из плотных модификаций нитрида бора.

Поэтому, исследования направленные на повышение эффективности процесса выглаживания является актуальной.

3. Цель исследования. Изучение НДС зоны пайки при изготовлении выглаживателей путем ее 3D моделирования.

4. Материалы исследования. В программном пакете SOLIDWORKS была разработана 3D модель выглаживателя (рис. 1), где с помощью приложения CosmosWorks изучалось НДС для случая использования каждого из исследуемых материалов.

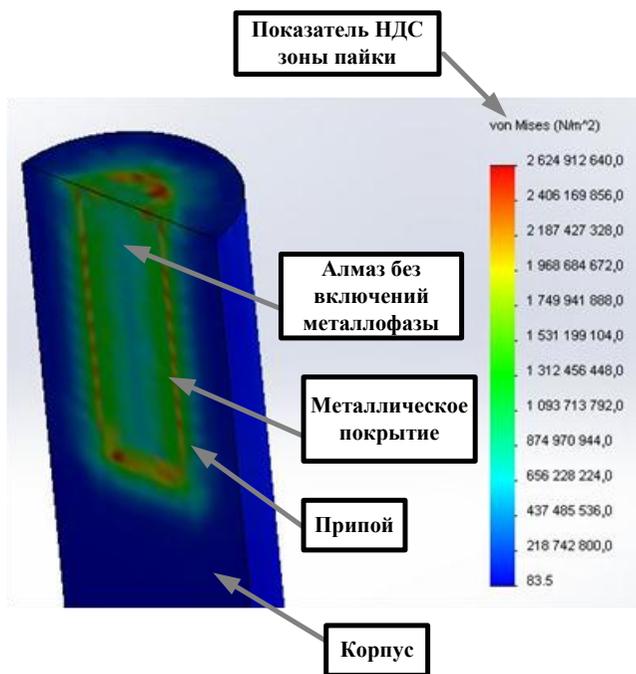


Рисунок 1 – 3D НДС зоны пайки алмазного выглаживателя в компьютерной программе SOLIDWORKS

Для получения адекватных результатов в данной программе закладывались все необходимые физико-механические свойства инструментальных материалов (табл. 1). В качестве представителей плотных модификаций нитрида бора использовались эльбор-Р и гексанит-Р [5].

Выглаживатель изготавливается пайкой, которая обеспечивает качественное крепление рабочей части в державке и позволяет уменьшить габариты инструмента. Поэтому изготовление инструмента, в частности из алмаза, связано с высокими температурами. Для лучшего удержания и предотвращения растрескивания рабочей части инструмента было предложено использовать дополнительное металлическое покрытие [8].

Таблица 1 – Физико-механические свойства материалов [1, 4]:

Материалы	Плотность, кг/м ³	Твердость, ГПа	Модуль упругости, ГПа	Предел прочности при изгибе, МПа	Предел прочности при сжатии, ГПа	Коэффициент теплопроводности при 20 ⁰ С, Вт/м·К	Включение металлофазы, %
Натуральный алмаз	3,47-3,55	99	885	1960	0,2	145	нет
CVD	3,52	85-100	1000-1100	1200-1300	1,0-3,0	600-2200	нет
АСПК	3,5-4,0	92-150	850	0,5-1,0	0,4-0,8	290-330	2-20
СКМ-Р	-	100	850	-	5,0	150-250	10
Синтетический лейкосапфир	3,99	23	450	567	2,6	83	нет
Минерало-керамика ЦМ 332	3,85-3,90	90	360	290-390	4,9	10,5	нет
Твердый сплав Т15К6	11,0-11,7	17	400	1050-1080	3,0-4,0	27	нет
Эльбор-Р	3,31-3,39	70-80	660-800	700-800	1,9-2,1	30-60	нет
Гексанит-Р	3,28-3,36	50-80	715-980	700-1500	2,0-5,0	25-80	нет

Результаты расчетов показали, что наименьшие напряжения имеют место в случае использования алмаза без содержания металлофазы (рис. 2).

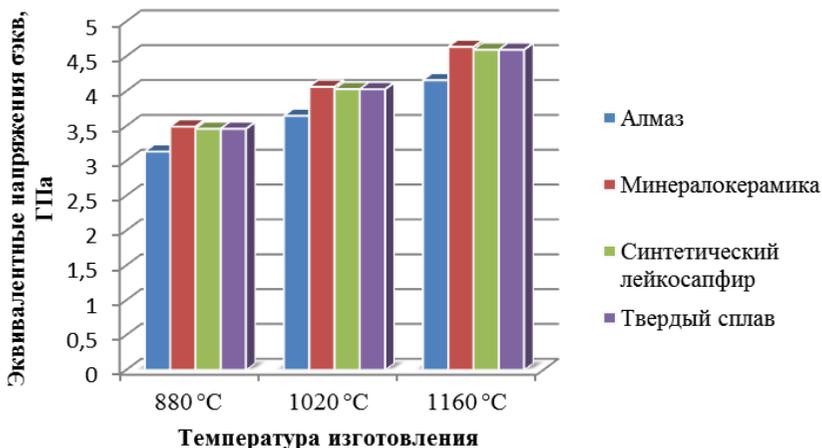


Рисунок 2 – Влияние температуры пайки на значения эквивалентных напряжений для различных инструментальных материалов

Следующим этапом исследования было установление оптимальных марок алмаза, наиболее подходящих для изготовления выравнивающих инструментов. Для экспериментов использовались следующие марки: натуральный алмаз, алмаз, изготовленный методом CVD, синтетический алмаз АСПК (метод прямого синтеза из графита) и СКМ-Р (метод порошковой металлургии) [4]. При моделировании инструмента в модель выравнивателя была включена металлофаза (в зависимости от марки алмаза). В случае нахождения в составе алмаза минимального количества металлофазы (или при ее практическом отсутствии) НДС системы должен быть минимальным по причине отсутствия концентратора возникновения значительных напряжений, что подтверждается данными рисунка 3. Учитывая то, что предел прочности алмаза на растяжение составляет примерно 2,0 ГПа, можно сделать вывод о том, что при пайке целостность алмазов, в составе которых практически нет металлофазы, гарантированно обеспечивается.

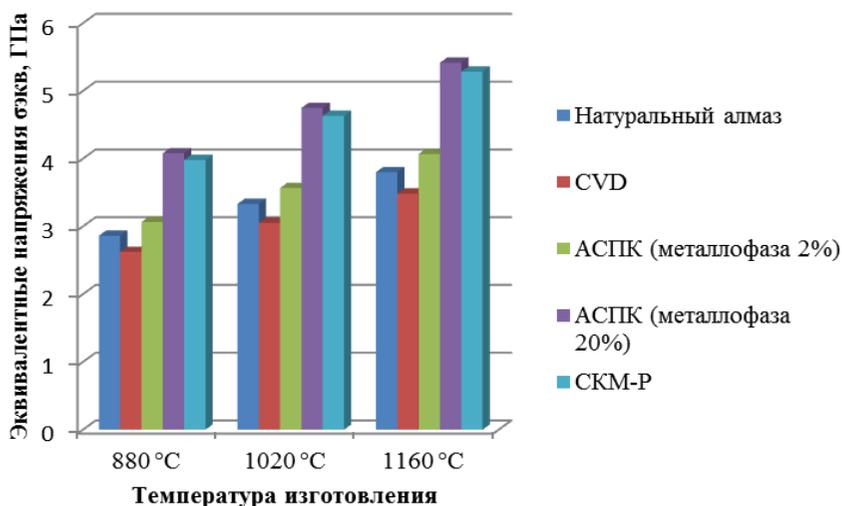


Рисунок 3 – Влияние температуры пайки на значения эквивалентных напряжений для различных марок алмазов

Результаты моделирования показали, что использование алмаза, изготовленного методом CVD, является оптимальным, так как возникающие эквивалентные напряжения ниже критических значений. Это объясняется тем, что с одной стороны он не имеет металлических включений, а другой повышенный предел прочности на растяжение (до 3 ГПа).

Поскольку коэффициент термического расширения металлофазы значительно выше чем у алмаза, то при ее значительном процентном содержании в алмазах марок АСПК и СКМ-Р это зачастую приводит к критическим значениям эквивалентных напряжений. В результате этого происходит растрескивание и даже полное разрушение алмаза при пайке инструмента.

По аналогии с практикой применения инструментов из эльбора-Р и гексанига-Р для резания [4, 5, 6, 7] было сделано предположение о целесообразности их использования и для выглаживающего инструмента.

Методом 3D моделирования было исследовано НДС при пайке выглаживателей из этих сверхтвердых материалов (рис. 4). Эти результаты подтвердили защитную роль металлических покрытий на инструментальных материалах.

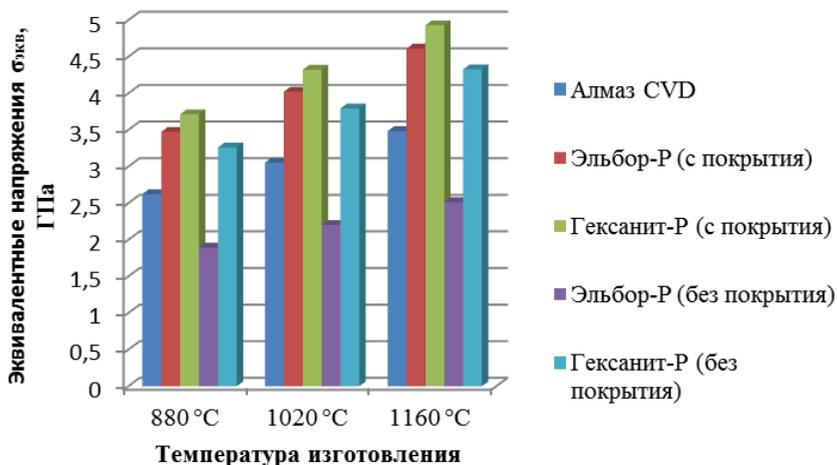


Рисунок 4 – Сравнительный анализ НДС при использовании алмаза и плотных модификаций нитрида бора для выглаживателей

Выводы и перспективы развития. 1. Алмаз, изготовленный методом CVD, является оптимальным для изготовления выглаживающего инструмента. 2. Модельные эксперименты показали на возможную перспективность применения эльбора-Р и гексанита-Р для выглаживающего инструмента.

В дальнейшем представляет интерес исследование НДС при изготовлении (заточке) выглаживателей алмазными кругами.

Список использованных источников: 1. *Торбило В.М.* Алмазное выглаживание [Текст] / В. М. Торбило. – М.: Машиностроение, 1972. – 105 с. 2. *Хрульков В. А.* Алмазные инструменты в прецизионном приборостроении / В. А. Хрульков, А. Я. Головань, А. И. Федотов. – М.: Машиностроение, 1977. – 223 с. 3. *Титов В.А.* Некоторые перспективные направления развития процессов выглаживания конструкционных материалов / *Титов В.А., Титов А.В.* // Вісник національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ» – 2009. – № 32. – С. 78-86. 4. *Магазеев М.Г.* Повышение эффективности изготовления профильных инструментов из сверхтвердых и керамических материалов за счет сочетания электроэрозионной и алмазной обработки: дис...канд. техн. наук: 05.03.01 / *Магазеев Михаил Геннадиевич.* – Харьков, 1997. – 204 с. 5. Режущие инструменты, оснащенные сверхтвердыми и керамическими материалами, и их применение: Справочник / *Жедь В.П., Боровский Г.В., Музыкант Я.А., Инполитов Г.М.* – М.: Машиностроение, 1987. – 320 с. 6. Инструменты из сверхтвердых материалов / под. ред. *Н.В. Новикова и С.А. Клименко.* – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2014. – 608 с.: ил. 7. Полиморфные модификации углерода и нитрида бора: Справ. / *А.В. Курдюмов, В.Г. Малоголове, Н.В. Новиков и др.* – М.: Металлургия, 1994. – 318 с.

8. Рязанова-Хитровская Н.В. [Текст] / Некоторые пути повышения эффективности процесса алмазного выглаживания / *Пыжов И.Н., Рязанова-Хитровская Н.В., Крюкова Н.В.* // *Высокі технології в машинобудуванні: зб. наук. праць.* – Вип. 1. – Харків: НТУ «ХПІ», 2015. – с. 173-182.

Bibliography (transliterated): 1. Torbilo V.M. Almaznoe vyglazhivanie [Tekst]. – M.: Mashinostroenie, 1972. – 105 s. 2. Hrul'kov V.A., Golovan' A.Ja., Fedotov A.I. Almaznye instrumenty v precizionnom priborostroenii. – M.: Mashinostroenie, 1977. – 223 s. 3. Titov V.A., Titov A.V. Nekotorye perspektivnye napravlenija razvitiya processov vyglazhivaniya konstrukcionnyh materialov / *Visnik nacional'nogo tehničnogo universitetu «HPI».* Zbirnik naukovih prac'. Tematičnij vipusk: Novi rishennja v suchasnih tehnologijah. – Harkiv: NTU «HPI» – 2009. – № 32. – S. 78-86. 4. Magazeev M.G. Povyšenie jeffektivnosti izgotovlenija profil'nyh instrumentov iz sverhtverdyh i keramičeskikh materialov za schet sochetanija jelektroerozionnoj i almaznoj obrabotki: dis...kand. tehn. nauk: 05.03.01. – Har'kov, 1997. – 204 s. 5. Rezhushhie instrumenty, osnashennye sverhtverdymi i keramičeskimi materialami, i ih primenenie: Spravočnik / *Zhed' V.P., Borovskij G.V., Muzykant Ja.A., Ippolitov G.M.* – M.: Mashinostroenie, 1987. – 320s. 6. Instrumenty iz sverhtverdyh materialov / pod. red. N.V. Novikova i S.A. Klimenko. – Izd. 2-e, pererab. idop.—M.: Mashinostroenie, 2014. – 608 s.: il. 7. Polimorfnye modifikacii ugleroda i nitrida bora: Sprav. /*A.V. Kurdjumov, V.G. Malogolove, N.V. Novikov i dr.* – M.: Metalurgija, 1994. – 318 s. 8. Pyzhov I.N., Riazanova-Khytrovska N.V., Krjukova N.V. Nekotorye puti povyšeniya jeffektivnosti processa almaznogo vyglazhivaniya / *Visoki tehnologії v mashinobuduvanni: zb. nauk. prac'.* – Vip. 1. – Harkiv: NTU «HPI», 2015. – s. 173-182.

УДК 621.923.9:621.98.043

В.М. Тіхенко, д-р техн. наук, Одеса, Україна

РЕАЛІЗАЦІЯ ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНОГО ШЛІФУВАННЯ ДЛЯ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ ШТАМПІВ НА ПЛОСКОШЛІФУВАЛЬНОМУ ВЕРСТАТІ

Розглядається використання плоскошліфувального верстата для реалізації електроерозійного шліфування важкооброблюваних деталей штампів шляхом доопрацювання деяких його вузлів і доповнення комплектуючим обладнанням. Наводяться деякі практичні рекомендації щодо здійснення правки струмопровідних кругів і процесу шліфування.

Ключові слова: електроерозійне шліфування, правка струмопровідних кругів

Рассматривается использование плоскошлифовального станка для реализации электроэрозионного шлифования труднообрабатываемых деталей штампов путем доработки некоторых его узлов и дополнения комплектующим оборудованием. Приводятся некоторые практические рекомендации по осуществлению правки токопроводящих кругов и процесса шлифования.

Ключевые слова: электроэрозионное шлифование, правка токопроводящих кругов

The use of a surface grinding machine for the implementation of electroerosive grinding of hard-to-work parts of stamps by improving some of its components and completing the equipment is considered. Some practical recommendations for the implementation of edging current conducting circles and the grinding process are given.

Keywords: electroerosive grinding, correction of conductive circles

В даний час є велика потреба в різних виробках, для виготовлення яких використовуються штампи або пресформи. У цих випадках необхідно виготовлення деталей штампів для холодного листового штампування, холодного та гарячого об'ємного штампування, а також прес-форм для пресування пластмас, гуми та лиття з виплавлюваних моделей [1]. До поверхонь цих деталей висуваються підвищені вимоги з геометричної точності, шорсткості та стану поверхневого шару. У зв'язку з тим, що такі деталі виготовляють з важкооброблюваних матеріалів, формоутворення їх поверхонь на металорізальних верстатах звичайними методами малопродуктивне або взагалі неможливо. Електроерозійне шліфування є ефективним фізико-хімічним методом обробки тврдосплавних і жароміцних матеріалів [2, 3].

Незважаючи на те, що даний метод давно відомий, в сучасних умовах його застосування стримується відсутністю необхідного верстатного обладнання. Верстати для електроерозійного шліфування розроблялися як спеціальні та вироблялися в обмеженій кількості. Різне скорочення конструкторських організацій і верстатобудівних підприємств в Україні призвело до того, що на теперішній час складно розмістити замовлення на проектування та виготовлення нового верстатного обладнання, а імпорتنі

верстати мають досить високу вартість. Значно дешевше обійдеться варіант модернізації серійних шліфувальних верстатів, випущених навіть багато років тому. З цим завданням можуть впоратися навіть невеликі підприємства, які спеціалізуються на ремонті та модернізації устаткування.

Метою цієї статті є розгляд можливості та особливості використання модернізованого плоскошліфувального верстата з прямокутним столом і горизонтальним шпинделем для електроерозійного шліфування деталей штампів та прес-форм.

Компонування верстата залишається аналогічним як у серійної моделі, проте частково змінюються існуючі вузли і додається нове комплектуюче обладнання. Особливістю конструкції верстата є те, що шпиндель шліфувального круга токоізольований від корпусу шліфувальної бабки, а на його задній частині є кільцевий токопровід для підведення технологічного струму. З метою запобігання витоку струму через підшипники на корпус бабки, що може вивести з ладу підшипники, останні монтуються в гільзах, які токоізольовані від корпусу бабки. Механізми вертикальної та поперечної подачі залишаються без змін. Шліфування проводиться периферією струмопровідного шліфувального круга методом порядкових проходів при поперечних подачах шліфувальної бабки із застосуванням спеціальної робочої рідини (електроліту). Технологічний струм підводиться одним полюсом (негативним) до шліфувального круга, а іншим (позитивним) до заготовки. Плита столу, на якій встановлюються пристосування для закріплення оброблюваних деталей і деякі інші вузли верстата також токоізольовані від станини. Після закріплення деталі необхідно з'єднати струмопровідну шину пристосування з підведенням від джерела технологічного струму. Для запобігання розбризкування електроліту стіл має спеціальну огорожу робочої зони. Всі деталі верстата, які стикаються з електролітом, повинні бути виконані з нержавіючої сталі та бронзи.

Для правки шліфувального круга алмазними роликми в верстаті є механізм правки, який встановлюється на столі. Подача круга на алмазний ролик відбувається періодичними імпульсами. Після правки шліфувальний круг має невисокі ріжучі властивості тому, що його абразивні зерна залишаються втопленими в одному рівні з металевою зв'язкою. Для додання кругу ріжучих властивостей необхідно зменшити рівень зв'язки. Оскільки абразивні зерна є діелектриками, а зв'язка проводить електричний струм, можна використовувати ефект електрохімічного травлення. З цією метою проводиться «шліфування» металевої пластини з використанням електроліту та підключення до круга позитивного полюса джерела технологічного струму, а до пластини – негативного полюса. При цьому зв'язка круга розм'якшується та розчиняється в електроліті, абразивні зерна оголюються і круг набуває необхідні ріжучі властивості.

Передбачено два окремих резервуари: один для електроліту, другий для гарячої води, необхідної для промивання робочої зони верстата в кінці зміни або перед зупинкою його на тривалий час. Резервуар для електроліту розділений на два відсіки – для часткового гравітаційного очищення електроліту від абразиву та продуктів анодного розчинення. На резервуарі розміщені два насоса та гідроциклон, перед яким встановлено змінна ємність для періодичного шламу, який відокремлюється гідроциклоном з електроліту. Один насос призначений для подачі забрудненого електроліту в гідроциклон, а другий – для подачі очищеного електроліту в зону шліфування. Резервуар для промивочної гарячої води складається з двох ємностей, які не сполучаються між собою. В одну ємність перед закінченням зміни наливають гарячу воду (температура води 50...80 °С), а в другу – зливається брудна промивна вода. Крім того необхідно встановити повітроочисний агрегат для видалення газоподібних продуктів із зони обробки.

На підставі практичного досвіду експлуатації подібних верстатів був запропонований склад електроліту:

- нітрат натрію (NaNO_3) – 10...12%;
- нітрит натрію (NaNO_2) – 0,5...0,8%;
- сіль кухонна (NaCl) – 2,0...2,5%;
- гліцерин – 2,0...3,0%;
- вода – інше.

Концентрація електроліту $\rho = 1,055...1,060 \text{ г/см}^3$. Величина рН становить 7...9.

Контроль основних фізико-хімічних характеристик електроліту (ρ та рН) слід проводити як відразу після приготування електроліту, так і на протязі експлуатації. При необхідності слід проводити коригування розчину до вказаних вище значень шляхом додавання свіжого розчину або повної його заміни.

Правку струмопровідних абразивних кіл на металевій зв'язці слід проводити на малих величинах подачі столу при рівномірному русі, домагаючись якісної правки шляхом призначення більшої кількості імпульсів технологічного струму. Це відноситься також і до процесу електроерозійного шліфування. Якщо базовий гідропривод продольної подачі столу не в змозі забезпечувати повільні швидкості руху без стрибків, то раціонально застосувати гідросхему, яка запропонована та досліджена для обробно-розточувальних верстатів і дозволяє здійснювати стабільні швидкості руху близько 5 мм/хв [4]. Альтернативним рішенням може бути електромеханічний привід з кульково-гвинтовим механізмом.

Запропонований варіант переобладнання серійного плоскошліфувального верстака з прямокутним столом і горизонтальним шпинделем дозволяє з найменшими фінансовими витратами реалізувати процес електроерозійного шліфування деталей з важкооброблюваних матеріалів, зокрема, штампів і прес-форм різного призначення, скоротити терміни їх виготовлення. Можливе використання цього варіанту для обробки твердосплавних інструментів і деталей з жароміцних і магнітних сплавів, наприклад, ялинкових хвостовиків лопаток, постійних магнітів.

Список використаних джерел: 1. Палей М. М. Технология производства приспособлений, прессформ и штампов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1979. – 293 с. 2. Подураев В.Н. Технология физико-химических методов обработки. – М.: Машиностроение. 1985. – 152 с. 3. Высокопроизводительное электроалмазное шлифование инструментальных материалов // М.Ф. Семко, Ю.Н. Внуков и др. – Киев: Вища школа. Головное изд-во. 1979. – 232 с. 4. Тихенко В.Н., Волков А.А. Исследование стабильности движения гидроприводов подачи стола отделочно-расточных станков // Труды Одес. политехн. у-та. – Одесса, 2011, Вып. 2(36). – С. 75 – 80.

Bibliography (transliterated): 1. Palej M.M. Tehnologija proizvodstva prisposoblenij, pressform i shtampov. – 2-e izd., pererab. i dop. – M.: Mashinostroenie, 1979. – 293 s. 2. Poduraev V.N. Tehnologija fiziko-himicheskikh metodov obrabotki. – M.: Mashinostroenie. 1985. – 152 s. 3. Vysokoproizvoditel'noe jelektroalmaznoe shlifovanie instrumental'nyh materialov / M.F. Semko, Ju.N. Vnukov i dr. – Kiev: Vishha shkola. Golovnoe izd-vo. 1979. – 232 s. 4. Tihenko V.N., Volkov A.A. Issledovanie stabil'nosti dvizhenija gidroprivodov podachi stola otdelochno-rastochnyh stankov / Trudy Odes. politehn. u-ta. – Odessa, 2011, Vyp. 2(36). – S. 75-80.

УДК 621.793.7

В.М. Тонконогий, д-р техн. наук; А.С. Сінковський, канд. техн. наук;
О.В. Рибак, Одеса, Україна

АНАЛІЗ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОЗИЦІЙНИХ ПОРОШКІВ ДЛЯ ПЛАЗМОВОГО НАПИЛЮВАННЯ НА ОСНОВІ TiC – Ni(P) – Cu ПРИ РОЗРОБЦІ САПР ТП ШЛІФУВАННЯ ПОКРИТТІВ

У даній роботі наведені результати досліджень характеристик плазмових покриттів на основі композиційних порошків системи TiC – Ni(P) – Cu у процесі їхнього шліфування та подальшої експлуатації. Випробування проводились в умовах, у яких передбачається подальше використання деталей з цим покриттям. Була виявлена залежність міцності зчеплення покриття з основою, когезійної міцності і пористості та інших критично важливих характеристик таких покриттів від параметрів процесу їхнього нанесення. При дослідженні покриттів на основі TiC – Ni(P) – Cu на зносостійкість за певних умов зношування не спостерігалось внаслідок явища вибіркового перенесення.

Ключові слова: плазмові покриття, когезійна міцність

В данной работе приведены результаты исследований характеристик плазменных покрытий на основе композиционных порошков системы TiC – Ni(P) – Cu в процессе их шлифования и дальнейшей эксплуатации. Испытания проводились в условиях, в которых предполагается дальнейшее использование деталей с этим покрытием. Была выявлена зависимость прочности сцепления покрытия с подложкой, когезионной прочности и пористости, а также других критически важных характеристик таких покрытий от параметров процесса их нанесения. При исследовании покрытий на основе TiC – Ni(P) – Cu на износостойкость при некоторых условиях изнашивание не наблюдалось, что объясняется явлением избирательного переноса.

Ключевые слова: плазменные покрытия, когезионная прочность

The results of the research of plasma coatings' characteristics during the process of their grinding and future maintenance are given in this article. Coatings are based on composite powders of titanium carbide plated with the solid solution of phosphorus in nickel and plated with copper afterwards. Investigation was carried out in the conditions which are supposed to be operating conditions for the details with these coatings in the future. It was discovered that the adhesive strength, cohesive strength and the porosity as well as some other characteristics of critical importance for the coatings depend on variables of plasma spraying process. During the investigation of the wear resistance of coatings based on TiC – Ni(P) – Cu under certain conditions wear was not observed at all. The reason for this is the selective transfer phenomenon.

Keywords: coatings, cohesive strength

Вступ. На даний час одним з найбільш перспективних напрямків підвищення ефективності технологічних процесів фінішної обробки деталей є створення систем автоматизованого проектування шліфувальних операцій. Врахування значень керуючих параметрів та взаємозв'язків між ними, а також технологічних обмежень, що впливають на продуктивність процесу шліфування, дозволяє визначити оптимальні режими роботи для кожного

конкретного способу шліфування, матеріалу і розмірів шліфувального круга та інших умов. Особливо гостро постає питання розробки методики оптимізації процесу шліфування деталей з плазмовим покриттям, адже у цьому випадку поряд із триботехнічними властивостями, міцністю, твердістю і зносостійкістю слід вивчати пористість покриття та міцність зчеплення покриття з основою.

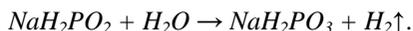
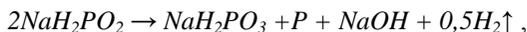
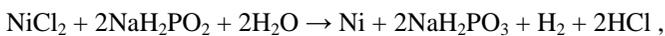
Використання композиційних матеріалів для плазмового напилювання відкриває шлях для інженерії робочих поверхонь деталей, наперед задаючи їхню структуру, а також хімічні та фізико-механічні властивості (наприклад, корозійну стійкість чи зносостійкість). Однак експлуатаційні характеристики та режими фінішної обробки покриттів не можна повною мірою визначити за їхньою товщиною і хімічним складом. Необхідно також враховувати матеріал підложки, режими напилювання та вибір плазмоутворюючого газу.

Саме тому **метою даної роботи** став аналіз взаємозв'язку експлуатаційних характеристик плазмових покриттів від умов їхнього одержання і визначення таких параметрів процесу нанесення покриттів, за яких використання деталей із зазначеним покриттям є найбільш ефективним.

Аналіз попередніх досліджень. Випробування плазмових покриттів на основі композиційних порошків карбіду вольфраму WC, а також карбіду титану TiC, плакованих твердим розчином фосфору в нікелі Ni(P), виявили їхню високу зносостійкість та інші переваги при використанні у промисловості [1, 2]. Аби покращити триботехнічні властивості цих матеріалів було вирішено ввести до їхнього складу мідь. Виходячи з теорії вибіркового перенесення, відкритого професорами Д.Н. Гаркуновим та І.В. Крагельським, спонтанне утворення тонкої плівки міді на поверхні значно зменшує зношування і коефіцієнт тертя деталей, що труться [3-5]. У межах проведених досліджень переважно вивчалися композиції на основі TiC, тому що він значно дешевший і менш дефіцитний ніж WC. Були розглянуті порошки з наступним співвідношенням компонентів: 30%TiC + 10%Ni(P) + 60%Cu; 40%TiC + 20%Ni(P) + 40% Cu; 40% TiC + 50%Ni(P) + 10% Cu; 50%TiC + 40%Ni(P) + 10% Cu. Після випробовування цих композицій на зношування у подальших експериментах було вирішено зупинитись на останніх двох композиціях.

Методика плакування карбідів титану нікелем та міддю. Процес плакування проводили хімічним методом із водних розчинів солей Ni та Cu. Для цього використовували порошки карбіду титану розміром від 40 мкм до 100 мкм. Склад ванни для нанесення нікелю наступний: хлорид нікелю ($NiCl_2 \cdot 6H_2O$) або сульфат нікелю ($NiSO_4 \cdot 7H_2O$), сульфат амонію $(NH_4)_2SO_4$, ацетат натрію (CH_3COONa). В якості відновника використовували гіпофосфіт натрію (NaH_2PO_2) та стабілізатори ОП-1 та ОП-2 рослинного походження, створені на кафедрі Технології конструкційних матеріалів та матеріалознавства Одеського національного політехнічного університету.

Ці стабілізатори дають можливість спрямовувати осадження в основному на частинки порошку, а не на стінки посудини. Як наслідок, ступінь осадження металу сягає 98% до повної прозорості розчину. Нагрівання розчину проводиться в емальованому посуді при температурі 90...100°C, рівень рН = 5,0.....5,5. В процесі нанесення нікелю розчин постійно перемішується, а також корегується кислотність ванни, щоб вона залишалась незмінною. При цьому в розчині спостерігається перебіг наступних реакцій:



Наведені реакції свідчать про те, що в результаті даного процесу на поверхні деталі осаджується не лише нікель, а й фосфор, кількість якого залежить від величини рН розчину. При нагріванні зразків з покриттям до температури 400°C розчинений в ньому фосфор взаємодіє з нікелем, утворюючи тверді фосфіди, які підвищують їхню зносостійкість. Фосфор також знижує коефіцієнт тертя деталей і зменшує зношування поверхонь, що труться. Коли процес плакування завершений, порошок промивається водою, потім спиртом, а далі поміщається в сушильну шафу при температурі 200°C, і витримується там дві години.

Наступною операцією для отримання зазначених композиційних порошоків стало плакування міддю, яка теж наносилася хімічним методом. Склад ванни наступний: сульфат міді ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), винна кислота ($\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_6$), шавлева кислота ($\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4$), гідразин солянокислий ($\text{N}_2\text{H}_4 \cdot 2\text{HCl}$), гідроксид амонію (NH_4OH), гідроксид натрію (NaOH), етилендіамін ($\text{H}_2 \cdot \text{NCH}_2 \cdot \text{CH}_2 \cdot \text{NH}_2$). Вагові величини компонентів визначаються за кількістю міді, необхідної для плакування порошку. Після плакування міддю порошок промивається та знову просушується.

Матеріал та результати досліджень. Процес нанесення покриттів проводився на плазмовій установці Київ-7. Режимми напильовання були наступними: величина струму становила 200 А, напруга – 200 В. Відстань від перерізу сопла плазмотрона до місця розташування зразка, якої тримувались під час нанесення покриттів, залежить від природи плазмоутворюючого газу. Найменшою вона була при використанні у якості плазмоутворюючих газів аргону і гелію. У цих газів відсутня дисоціація, а значить відсутня і теплота, яка виділяється при рекомбінації молекул, що знижує їхню ентальпію. Крім того, для цих газів характерний низький коефіцієнт тепловіддачі, що негативно впливає на нагрівання частинок порошку в потоці плазми. Надзвичайно важливою властивістю плазмових покриттів є адгезійна міцність їхнього зчеплення з основою, у якості якої найчастіше виступає сталь. Величину зчеплення вимірювали методом штифта

шляхом відриву його на розривній машині, яку використовують для визначення міцності дроту.

На рис.1 наведено графіки залежності міцності зчеплення плазмового покриття, що складається з порошку 50%TiC + 40%Ni(P) + 10%Cu, від відстані розташування зразка по відношенню до перерізу сопла плазмотрона. Криві 1, 2, 3 відповідають дозвуковому режиму напилювання, при цьому для кривої 1 використовувався плазмоутворюючий газ аргон; для кривої 2 плазмоутворюючим газом був гелій; для кривої 3 – суміш повітря і 10% метану. Крива 4 характеризує надзвуковий режим, плазмоутворюючим газом слугувала суміш повітря і 10% метану.

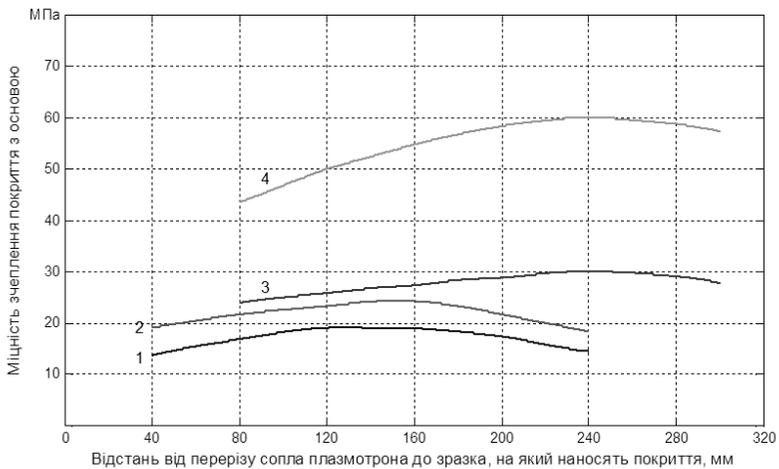


Рисунок 1 – Залежність міцності зчеплення плазмового покриття з основою від відстані розміщення зразка по відношенню до перерізу сопла плазмотрона

З графіків видно, що при дозвуковому напилюванні міцність зчеплення покриття з основою буде найвищою у випадку використання в якості плазмоутворюючого газу суміші повітря і метану. Це пояснюється тим, що нагрівання частинок порошку відбувається не лише за рахунок виділення теплоти під час реакцій рекомбінації та деіонізації, а ще й за рахунок теплоти згоряння продуктів розпаду метану. Але при надзвукових потоках плазмового струменю з використанням в якості плазмоутворюючого газу суміші повітря і 10% метану міцність зчеплення покриття з основою буде найбільшою.

Іншою важливою характеристикою плазмових покриттів є їхня когезійна міцність, яка в свою чергу в значній мірі залежить від величини пористості. Чим більші розміри частинок порошку, тим меншу кінетичну енергію вони

одержують, прискорюючись в потоці плазми, і до меншої температури прогріваються. Це призводить до зменшення міцності зчеплення між частинками в покритті і утворення пор.

На рис. 2 наведено графіки залежності значень пористості плазмового покриття на основі порошку TiC + Ni(P) + Cu для дозвукового (1) та надзвукового (2) режимів напилювання. З них видно, що зі збільшенням розмірів частинок, які входять до фракції, збільшується і пористість отриманого покриття як при дозвукових, так і при надзвукових режимах плазмового напилювання, хоча у другому випадку її значення значно менші.

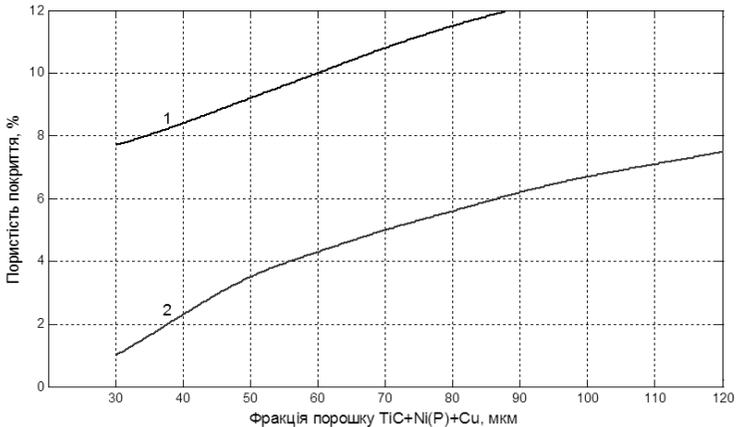


Рисунок 2 – Залежність пористості покриття від фракції використовуваного порошку TiC + Ni(P) + Cu при напилюванні у дозвуковому (1) і надзвуковому (2) режимах

З точки зору ефективної експлуатації та режимів кінцевої обробки покриттів виключно важливою характеристикою є їхня зносостійкість. Дослідження цієї характеристики проводилось у середовищах, в яких передбачається подальше використання деталей з таким покриттям. Під час випробувань в умовах граничного тертя (коефіцієнт тертя $0,05 \pm 0,02$) зі швидкістю 14 м/с при тиску 10 МПа і пробігу в 100 км з використанням дизельного палива у якості мастила, покриття на основі порошку TiC + Ni(P) + Cu показали хороші результати [6, 7]. У табл. 1 наведені порівняльні дані досліджень покриттів з даного композитного порошку та інших матеріалів, які випробовувались в ідентичних умовах. Як видно з таблиці, зношення плазмових покриттів з порошку TiC + Ni(P) + Cu втричі менше, ніж одержаного таким самим методом покриття з ПН55Т45.

Таблиця 1 – Результати досліджень покриттів в умовах граничного тертя в парі з легованим чавуном

Матеріал покриття	Умови одержання покриття	Зношення, мкм	
		покриття	контргіла
Сталь-молібден	Газополуменева металізація дротом	-110	-40
PH55T45	Плазмове, надзвукове	-96	-27
Хром	Електроліз	-40	-20
40%TiC+50%Ni(P)+10%Cu	Плазмове, надзвукове	-30	-11

Композиція TiC + Ni(P) + Cu має ще більш високу зносостійкість і низький коефіцієнт тертя при використанні фреону в якості мастила. За умови правильного підбору контргіла і виду мастила в процесі тертя спостерігається вибіркоче перенесення матеріалу покриття. Тому порошки TiC + Ni(P) + Cu викликають особливий інтерес у машинобудуванні і ремонтному виробництві. Покриття пройшли випробування на зношування на стенді впродовж 800 годин по системі вал-втулка при періодичному змащуванні фреоном і показали відсутність зношування в парі з підшипником із бронзи БрОЦС5-5-5. Коефіцієнт тертя склав 0,0075. Вибіркове перенесення при терті цієї пари також спостерігається у випадку використання в якості мастил індустриальних масел.

При розрахунках економічної складової одержання деталей з плазмовим покриттям важливим показником є коефіцієнт використання порошку (КВП). При плазмовому напилюванні деяка кількість порошку випаровується і окиснюється в газовому потоці, крім того, певна частина порошку розсіюється, особливо при нанесенні покриттів на круглі деталі типу шийок колінчастих і розподільчих валів автомобілів. Цей коефіцієнт залежить також від відстані між перерізом сопла плазмотрона та зразком. На рис. 3 наведена залежність КВП від дистанції напилювання порошку TiC + Ni(P) + Cu на плоску пластинку зі ст.3.

Окислювальна властивість потоку плазми згоряння в значній мірі залежить від вмісту метану в суміші з повітрям. При зменшенні його кількості ступінь окиснення порошку збільшується, а отже, зростають і втрати. На рис. 4. наведена залежність коефіцієнта використання матеріалу від вмісту метану в суміші.

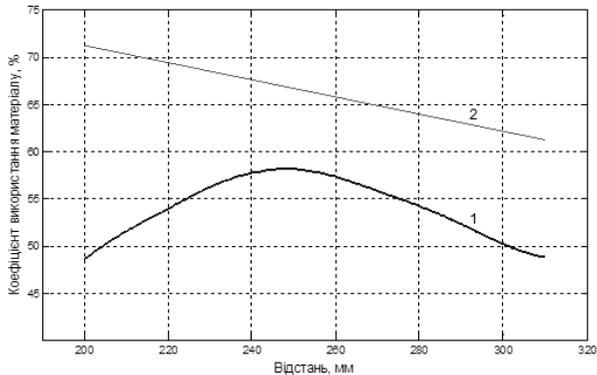


Рисунок 3 – Залежність коефіцієнта використання матеріалу від дистанції напилування на дозвуковому (1) і надзвуковому (2) плазмотронах при вмісті 10% метану у суміші

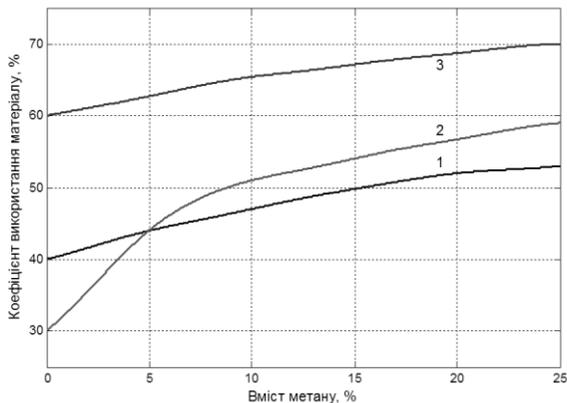


Рисунок 4 – Залежність коефіцієнта використання матеріалу від вмісту метану в суміші з повітрям. Дистанція напилування 300 мм (1, 2) і 250 мм (3). Витрати плазموутворюючого газу 7 м³/год (1, 3) і 5 м³/год (2)

Висновки. Плазмові покриття на основі композиційних порошків TiC + Ni(P) + Cu, створених за методикою плакування карбідів титану нікелем, кобальтом та міддю хімічним способом з розчинів солей цих металів, характеризуються особливо високою зносостійкістю. Зокрема, у випадку роботи цих покриттів в парі з контртілом із бронзи БрОЦС5-5-5 зношення зовсім відсутнє. Це пояснюється явищем вибіркового перенесення завдяки спонтанному утворенню тонкої плівки міді на поверхні контакту. Така

УДК 621.923

В.А. Федорович д-р техн. наук, Е.В. Островерх канд. техн. наук,
Н.В.Козакова канд. техн. наук, Харьков, Украина

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО СОЧЕТАНИЯ КОМПОНЕНТОВ В СПЕКАЕМОМ СЛОЕ АЛМАЗНО-АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА

Представлено результати теоретичного визначення структури й фізико-механічних властивостей алмазно-абразивних інструментів на етапах їх проектування й виготовлення. Шляхом розрахунків методом кінцевих елементів напружено-деформованого стану зони спікання алмазно-абразивного інструмента без тривалих і трудомістких експериментальних досліджень можна визначити оптимальні характеристики алмазних кругів.

Ключові слова: алмазне зерно, металофаза, зв'язка, напружено-деформований стан, планування експеримента

Представлены результаты теоретического определения структуры и физико-механических свойств алмазно-абразивных инструментов на этапах их проектирования и изготовления. Путем расчетов методом конечных элементов напряженно-деформированного состояния зоны спекания алмазно-абразивного инструмента без длительных и трудоемких экспериментальных исследований можно определять оптимальные характеристики алмазных кругов.

Ключевые слова: алмазное зерно, металлофаза, связка, напряженно-деформированное состояние, планирование эксперимента

The results of the theoretical determination of the structure and physical and mechanical properties of diamond-abrasive tools at the stages of their design and making are presented. It is established that by calculating the stress-strain state of the sintering zone of diamond abrasive tool by the finite element method, it is possible to determine the optimum characteristics of diamond wheels without long and labour intensive experimental researches.

Keywords: diamond grain, metal phase, bundle, stress-strain state, experiment planning

Ефективність процесу алмазного шліфования во многом определяється еще на етапі проектування інструмента путем вибору оптимального сочетания компонентів и свойств алмазоносного слоя. Эта задача, решаемая ранее путем трудоемких и дорогостоящих экспериментальных исследований, в настоящее время может быть решена теоретически с использованием метода конечных элементов [1, 2]. Эта методология позволяет расчетным путем выбрать оптимальные технологические параметры изготовления алмазных кругов. Правильный выбор состава композита в зависимости от назначения круга должен базироваться на научно обоснованных рекомендациях по оптимальному сочетанию концентрации, зернистости и прочности алмазных зерен, свойств связки, а также наличию покрытий, защищающих алмаз от деструкции при горячем прессовании [3]. Для обеспечения работы кругов в режиме

самозатачивания такой подход является единственно верным. Учитывая тот факт, что в зависимости от свойств алмазных порошков их стоимость может отличаться в сотни раз, обоснованный выбор марки абразива является необходимым и с точки зрения себестоимости алмазно-абразивного инструмента. В то же время, существующие в литературе рекомендации носят общий характер и весьма разноречивы, что снижает эффективность их использования и приводит к необоснованному повышению себестоимости алмазных кругов. Не менее важным является правильный выбор технологических параметров изготовления алмазных кругов с учетом физико-химических особенностей процессов, происходящих при их формировании.

Анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) алмазоносного слоя осуществлялся путем его 3D моделирования. Проводилась серия расчетов для фрагмента алмазоносного слоя, включающего единичное алмазное зерно, окруженное массивом связки (рис. 1). Рассматривались два типа моделей алмазного зерна. Первая модель представляет собой эллипсоид вращения (рис. 1 а), вторая – октаэдр (рис. 1 б). В зависимости от рассматриваемой зернистости, размеры зерен варьировались от $50 \times 30 \times 30$ до $500 \times 300 \times 300$ мкм. Наличие металла-катализатора в алмазных зернах моделировалось произвольно ориентированными пластинами, объемное содержание которых составляло 5 или 10 %. Рассматривалось наличие одного или двух включений металлофазы, расположенных на периферии зерна. Связка представлялась в виде кубического фрагмента с размерами от $0,5 \times 0,5 \times 0,5$ до $3 \times 3 \times 3$ мм в зависимости от размера и концентрации зерен. При моделировании варьировались размер зерна, соответствующий зернистостям от 50/40 до 500/400 мкм, температура и давление спекания, а также физико-механические свойства исследуемых компонентов спека. В модели зерно и связка рассматривались упругими сплошными телами. Модель нагружалась статической одноосной равномерно распределенной нагрузкой, а также температурой, приложенной к моделируемым телам.

Поскольку предел прочности алмаза при растяжении ниже предела прочности при сжатии [4], то в качестве критерия разрушения принимались полученные расчетным путем значения максимальных растягивающих напряжений алмазов различных марок и зернистостей [2]. Теоретические расчеты в программном пакете *CosmosWorks* позволили рассчитать эквивалентные напряжения в спекаемых элементах с учетом их размеров, физико-механических свойств элементов модели и условий спекания. В расчетную модель закладывались следующие характеристики материалов: модуль упругости, коэффициент Пуассона, массовая плотность материала, коэффициент линейного термического расширения, теплопроводность материала и его удельная теплоемкость (рис. 2).

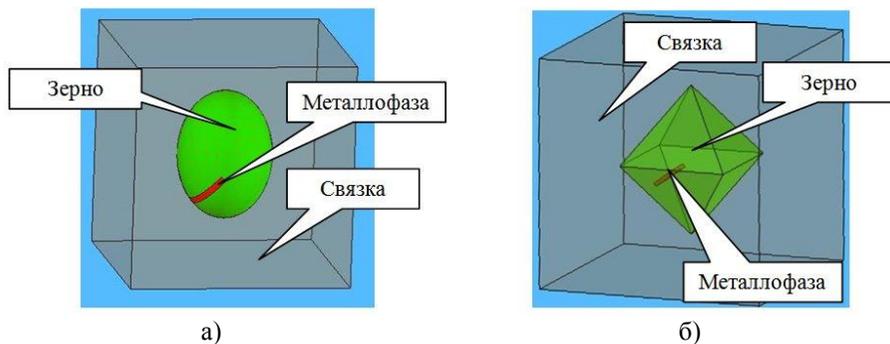


Рисунок 1 – Расчетная схема и 3D модель системы «металлофаза–алмазное зерно–связка»

Материал

Выбрать источник материала

- Использовать материалы SolidWorks
- Определенный пользователем
- Библиотека Centor
- Библиотечные файлы
 - cosmos materials
 - Other Alloys (3)
 - Plastics (19)
 - Other Metals (11)
 - Beryllium
 - Cobalt
 - Molybdenum
 - Nickel**
 - Pure Gold
 - Pure Lead
 - Pure Silver
 - Titanium
 - Tungsten
 - Vanadium
 - Zirconium
 - Other Non-metal

Свойства | Таблицы и кривые | Кривые усталости SN

Свойства материала

Тип модели:

Единицы:

Категория:

Имя:

Описание:

Свойств	Описание	Значение	Единицы из	Зависимость
EX	Модуль упругости	2.1e+011	N/m ²	Постоянная
NUXY	Коэффициент Пуассона	0.31	NA	Постоянная
GXY	Модуль сдвига	7.9e+010	N/m ²	Постоянная
DENS	Массовая плотность	8500	kg/m ³	Постоянная
SIGXT	Предел прочности при растяжении	317000000	N/m ²	Постоянная
SIGXC	Предел прочности при сжатии		N/m ²	Постоянная
SIGYLD	Предел текучести	59000000	N/m ²	Постоянная
ALPX	Коэффициент теплового расширения	1.7e-005	/Kelvin	Постоянная
KX	Теплопроводность	43	W/(m.K)	Постоянная
C	Удельная теплоемкость	460	J/(kg.K)	Постоянная

Рисунок 2 – Задаваемые значения физических свойств материалов в CosmosWorks

Нагружение системы «металлофаза–алмазное зерно–связка» осуществлялось по трем вариантам: только давлением (50–500 МПа); только температурой нагрева (400 °С и 800 °С); одновременно давлением и температурой.

В качестве реакции модели на нагружение рассматривались главные нормальные напряжения в узлах сетки, принадлежащих модели алмазного зерна и окружающей его связки. Расчетная конечно-элементная модель представлена на рис. 3.

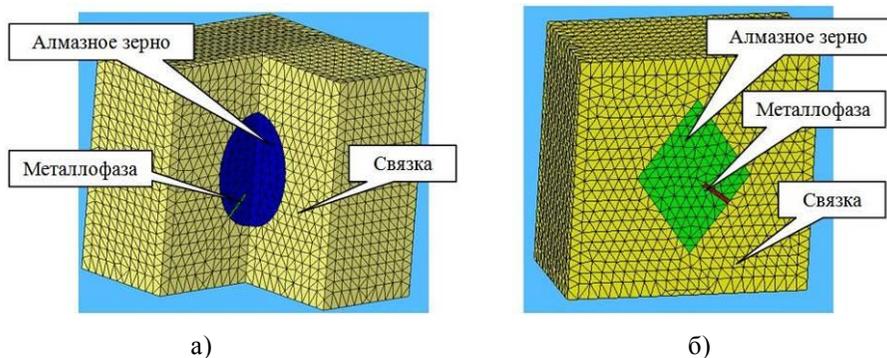


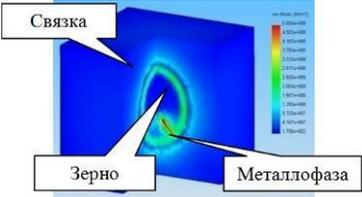
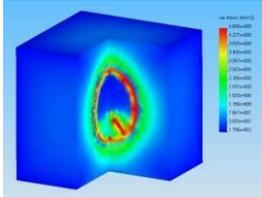
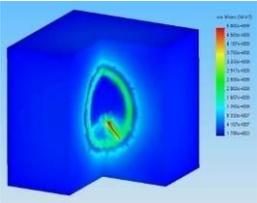
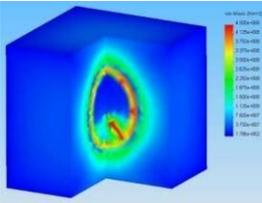
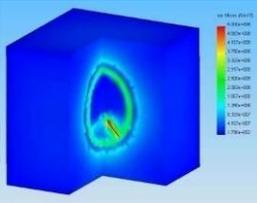
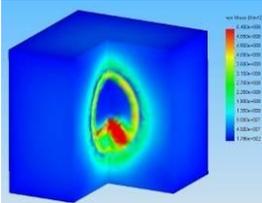
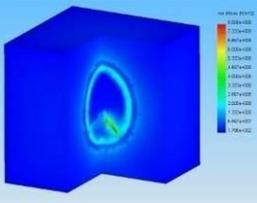
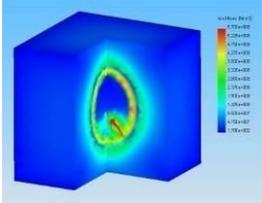
Рисунок 3 – Расчетная конечно-элементная 3D модель для: эллипсоида (а), октаэдра (б)

Выполненные расчеты показали, что нагружение системы «металлофаза–алмазное зерно–связка» только давлением во всем интервале его технологических значений для различных видов связок и марок алмазных зерен незначительно влияет на напряжения в исследуемой системе и не приводит к нарушению целостности алмазных зерен, в отличие от температуры, вызванные которой напряжения имеют гораздо большие значение и иную картину распределения.

Марка связки круга, определяющая надежность укрепления алмазных зерен в круге, обуславливает технологические режимы (давление и температуру) спекания алмазоносного слоя. Поэтому влияние ее свойств и режимов спекания на 3D напряженно-деформированное состояние алмазоносного слоя является взаимосвязанным. Результаты расчетов НДС алмазоносного слоя при спекании различных связок приведены в табл. 1.

Зависимости напряжений в системе «металлофаза–алмазное зерно–связка» от температуры для различных видов связок представлены в рис. 4.

Таблица 1 – Влияние свойств связки и технологических режимов спекания на целостность алмазного зерна

Марка связки	Температура спекания, °С	
	400	800
Керамическая	 <p>$\sigma_{\text{ЭКВ}} = 1,09 \text{ ГПа}$</p>	 <p>$\sigma_{\text{ЭКВ}} = 2,43 \text{ ГПа}$</p>
Алюминиевая	 <p>$\sigma_{\text{ЭКВ}} = 1,33 \text{ ГПа}$</p>	 <p>$\sigma_{\text{ЭКВ}} = 2,47 \text{ ГПа}$</p>
Железная	 <p>$\sigma_{\text{ЭКВ}} = 1,39 \text{ ГПа}$</p>	 <p>$\sigma_{\text{ЭКВ}} = 2,5 \text{ ГПа}$</p>
Бронзовая	 <p>$\sigma_{\text{ЭКВ}} = 2,07 \text{ ГПа}$</p>	 <p>$\sigma_{\text{ЭКВ}} = 3,72 \text{ ГПа}$</p>

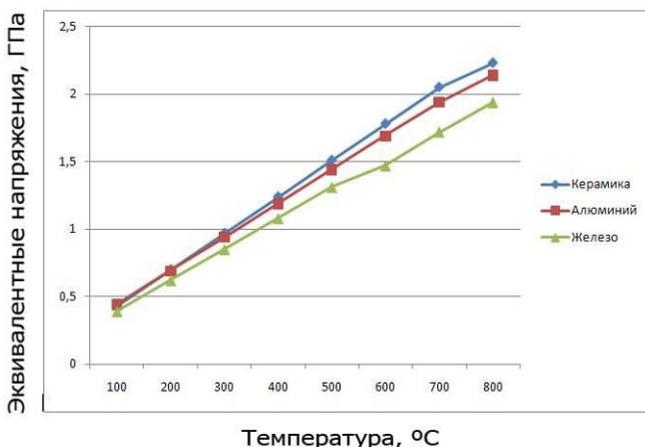


Рисунок 4 – Динамика изменения эквивалентных напряжений в системе «металлофаза–алмазное зерно–связка» с алмазным зерном марки AC100 (200/160)

Увеличение модуля упругости связки круга, как и увеличение температуры спекания, приводят к росту напряжений в связке и в зерне, которые могут достигать предела прочности для определенных марок алмаза. Расчеты также показывают, что очагом возникновения предельных напряжений во всех случаях является область металлических включений в алмазных зернах, о чем свидетельствуют поля приведенных напряжений для зерна марки AC100 (200/160), спекаемого на керамической связке при температуре 800 °C, представленные на рис. 5.

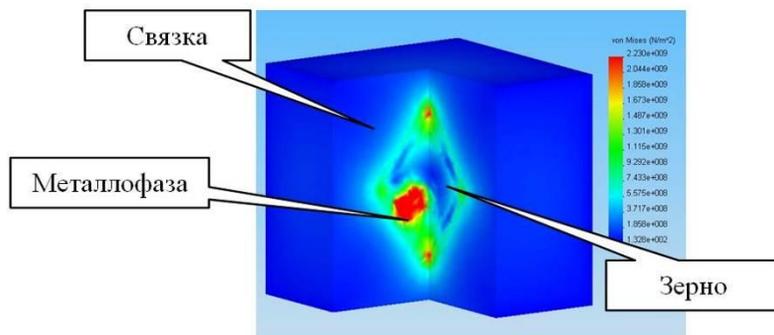


Рисунок 5 – Поля приведенных напряжений при спекании зерна марки AC100 (200/160)

Таким образом, наиболее значимыми параметрами с точки зрения сохранения целостности алмазоносного слоя в процессе изготовления круга являются температура спекания, а также модуль упругости связки, увеличение значений которых усиливает напряженное состояние зерна.

Ранее, при исследовании НДС системы «металлофаза–алмазное зерно–связка» [2, 5], расчетная модель строилась на основании допущения относительно изотропности свойств всех материалов системы. Однако известно, что кристалл алмаза, как поликристаллическое образование, обладает выраженной анизотропией свойств [6], для определения влияния которой проводилось моделирование процесса спекания алмазоносного слоя зерна АС160 зернистостью 200/160 при температуре спекания 700 °С. Данное алмазное зерно практически не имеет включений металлофазы, поэтому с его помощью можно наглядно оценить разницу в НДС системы при различных ориентациях алмазного зерна.

В данных расчетах принимался вариант, при котором модуль упругости одной из трех плоскостей сдвига $\{110\}/\{111\}/\{101\}$ равен соответственно 900/750/700 МПа. Результаты расчетов, показанные на рисунке 6 (а, б, в), представляют НДС системы «металлофаза–алмазное зерно–связка» при ориентировании фронтальной плоскости в качестве плоскости $\{110\}$, $\{111\}$ и $\{101\}$ кристалла соответственно.

Анализ полученных результатов расчета эквивалентных напряжений показал, что несмотря на разницу в картинах НДС алмазоносного слоя при различных ориентациях алмазного зерна, значения напряжений меняются всего на 10 %. Поэтому результаты расчетов без учета анизотропии можно считать адекватными.

Одним из эффективных методов повышения износостойкости алмазно-абразивного инструмента является металлизация сверхтвердых абразивных материалов, целесообразность которой убедительно доказана отечественной и зарубежной практикой [7, 8]. Применение алмазных зерен с различными видами покрытий может существенно расширить возможности бездефектного изготовления кругов на различных связках. Для подтверждения этого проведены расчетные эксперименты по изучению напряженно-деформированного состояния системы «металлофаза–алмазное зерно–покрытие–связка» с применением метода конечных элементов. Трехмерная модель данной системы представлена на рис. 6.

При моделировании процесса спекания в качестве факторов принимались: режимы спекания (температура, °С), свойства покрытия (модуль упругости при 500 °С), свойства связки (модуль упругости при 500 °С), свойства металла-катализатора (коэффициент термического расширения (КТР) при 500 °С), описание которых представлено в табл. 2.

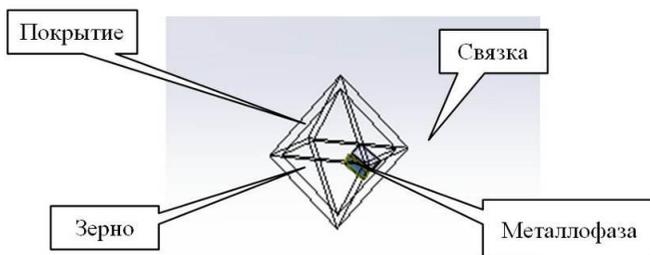


Рисунок 6 – Трехмерная модель системы «металлофаза–алмазное зерно–покрытие–связка»

Таблица 2 – Уровни факторов

Уровни факторов	Факторы							
	Режимы спекания (температура °C)		Свойства покрытия (модуль упругости при 500 °C), Н/м ²		Свойства связки (модуль упругости при 500 °C), Н/м ²		Свойства металла-катализатора (КТР при 500 °C), 1/К	
	Натуральное значение, °C	Кодированное значение X1	Натуральное значение, Н/м ²	Кодированное значение X2	Натуральное значение, Н/м ²	Кодированное значение X3	Натуральное значение, 1/К	Кодированное значение X4
Верхний уровень	800	+1	3.2 E+011	+1	1.9E+011	+1	2.4E-05	+1
Основной уровень	500	0	2.7E+011	0	1.5E+011	0	2.05E-05	0
Нижний уровень	200	-1	2.2E+011	-1	1.1E+011	-1	1.7E-05	-1

Значения исследуемых факторов для уравнения регрессии, представленные в табл. 3, позволили провести 24 расчетных эксперимента, визуализация результатов которых показана на рис. 7.

Таблица 3 – Условия и результаты планируемого расчетного эксперимента для спекания алмазных кругов

№ эксперимента	Режимы спекания (температура °С)	Свойства покрытия (модуль упругости при 500 °С), Н/м ²	Свойства связки (модуль упругости при 500 °С), Н/м ²	Свойства металла-катализатора (КТР при 500 °С), 1/К	У напряжение в зерне, ГПа
1	800	3.2E+011	1.9E+011	2.4E-05	3.58
2	200	3.2E+011	1.9E+011	2.4E-05	0.84
3	800	2.2E+011	1.9E+011	2.4E-05	3.70
4	200	2.2E+011	1.9E+011	2.4E-05	0.91
5	800	3.2E+011	1.1E+011	2.4E-05	3.94
6	200	3.2E+011	1.1E+011	2.4E-05	1.05
7	800	2.2E+011	1.1E+011	2.4E-05	3.82
8	200	2.2E+011	1.1E+011	2.4E-05	1.03
9	800	3.2E+011	1.9E+011	1.7E-05	3.27
10	200	3.2E+011	1.9E+011	1.7E-05	0.68
11	800	2.2E+011	1.9E+011	1.7E-05	3.47
12	200	2.2E+011	1.9E+011	1.7E-05	0.79
13	800	3.2E+011	1.1E+011	1.7E-05	3.98
14	200	3.2E+011	1.1E+011	1.7E-05	1.09
15	800	2.2E+011	1.1E+011	1.7E-05	3.85
16	200	2.2E+011	1.1E+011	1.7E-05	1.05
17	800	2.7E+011	1.5E+011	2.05E-05	10.42
18	200	2.7E+011	1.5E+011	2.05E-05	1.78
19	500	3.2E+011	1.5E+011	2.05E-05	3.11
20	500	2.7E+011	1.5E+011	2.05E-05	3.06
21	500	2.7E+011	1.9E+011	2.05E-05	4.32
22	500	2.7E+011	1.1E+011	2.05E-05	4.28
23	500	2.7E+011	1.5E+011	2.4E-05	4.31
24	500	2.7E+011	1.5E+011	1.7E-05	4.25

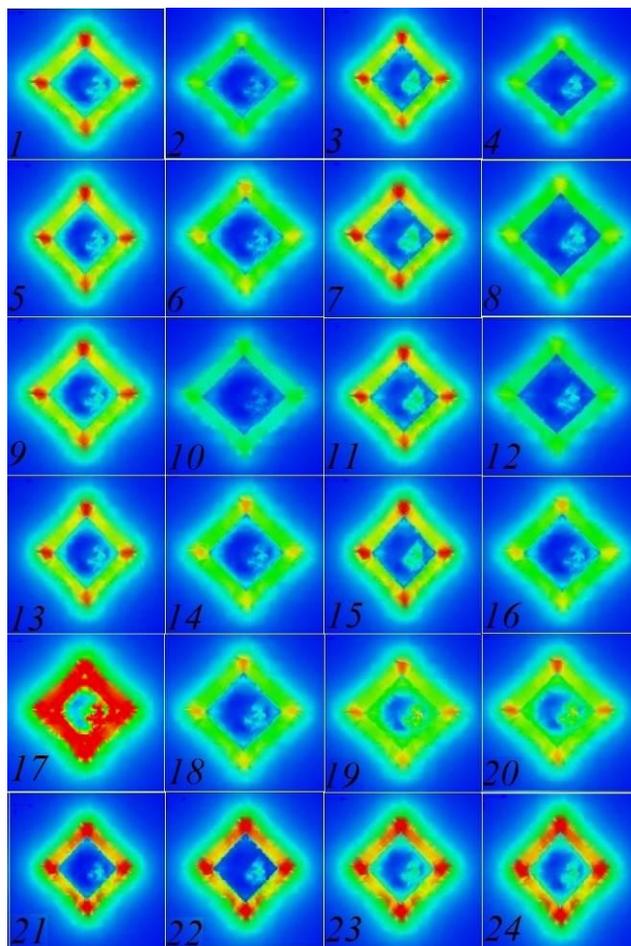


Рисунок 7 – Визуализация результатов моделирования влияния выбранных факторов на НДС зоны спекания алмазonoсного слоя

Напряжения, превышающие пределы прочности алмаза, расположены на границах включений металлофазы, вызывают развитие внутренних трещин в зерне. Проведение 24-х модельных экспериментов позволило установить математические зависимости между основными факторами, влияющими на состояние алмазonoсного слоя. Обработка результатов планируемого эксперимента позволила получить математическую модель, адекватно описывающую процесс спекания алмазных шлифовальных кругов с

покрытием в представленном диапазоне варьирования независимых факторов:

$$Y = 5,150 + 1,712X_1 - 0,008X_2 - 0,141X_3 + 0,042X_4 + 0,003X_1X_2 - 0,036X_1X_3 + 0,016X_1X_4 - 0,051X_2X_3 + 0,006X_3X_4 - 0,059X_3X_4 + 0,950X_1^2 - 2,065X_2^2 - 0,850X_3^2 - 0,870X_4^2 \quad (1)$$

Анализ влияния физико-механических свойств покрытия на напряжения в алмазном зерне показал, что сохранению целостности зерен круга отвечают максимальные значения модуля упругости материала покрытия. Так увеличение последнего с 220 до 320 ГПа приводит к уменьшению расчетных напряжений в зерне более чем в 3 раза. Наименьшие напряжения 0,68 ГПа в алмазном зерне, обеспечивающие их целостность при спекании круга, возникают при $T = 200$ °С, модуле упругости материала покрытия 320 ГПа, модуле упругости связки круга 190 ГПа и КТР металла-катализатора $1,7 \cdot 10^{-5}$ 1/К. Оптимизация полученного уравнения регрессии позволила получить значения факторов, при которых напряжения в алмазных зернах обеспечат эффективный процесс спекания алмазоносного слоя круга.

Исследования, выполненные с использованием представленной методологии трехмерного моделирования процесса изготовления алмазно-абразивного инструмента, и анализ полученных результатов позволили сделать следующие выводы.

– теоретические исследования показали, что алмазные шлифовальные круги вне зависимости от типа связки имеют исходную дефектность в виде разрушенных в процессе спекания алмазных зерен, главной причиной которой являются внутренние напряжения в зерне, обусловленные существенным различием значений коэффициентов термического расширения алмаза и включений металла-катализатора в нем;

– увеличение прочности связки круга и связанное с ним повышение температуры спекания алмазоносного слоя приводят к разрушению алмазных зерен определенных марок и зернистостей при изготовлении алмазно-абразивных инструментов;

– определяющую роль в обеспечении целостности алмазных зерен при спекании композиционных алмазных материалов играют качественные и количественные характеристики металла-катализатора. Преобладающее влияние на появление разрушающих напряжений имеет коэффициент термического расширения включений металлофазы, который значительно растет при нагревании: так при повышении температуры спекания до 800 °С уровень возникающих напряжений увеличивается в 1,2 и 1,6 раза для металлических и керамических связей соответственно;

– расчеты с учетом анизотропии алмазных зерен показали ее

незначительное, в пределах 10 %, влияние на напряженно-деформированное состояние спекаемой алмазно-абразивной композиции;

– на основе теории планирования эксперимента проведена оптимизация результатов 3D моделирования процесса спекания алмазно-абразивных композиций с металлическим покрытием зерен, что позволило теоретическим путем определить оптимальные значения факторов, при которых напряжения будут минимальны.

Список использованных источников: 1. Федорович В.А. Разработка научных основ и способов практической реализации управления приспособляемостью при алмазном шлифовании сверхтвердых материалов: Дис. ... д-ра техн. наук: 05.03.01. – Харьков, 2002. – 466 с. 2. Козакова Н.В. Определение рациональных характеристик алмазных кругов путем 3D моделирования процессов их изготовления и шлифования сверхтвердых материалов: Дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01. – Харьков, 2005. – 210 с. 3. Грабченко А.И. 3D моделирование процессов алмазно-абразивной обработки / А.И. Грабченко, В.А. Федорович. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2008. – 345 с. 4. Федорович В.А., Козакова Н.В. Влияние прочности элементов системы «СТМ–зерно–связка» на эффективность шлифования // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2003. – № 9, т. 1. – С. 85-92. 5. Грабченко А.И., Федорович В.А., Островерх Е.В., Козакова Н.В. Моделирование процесса спекания алмазных кругов на металлических связках с целью определения их рациональных характеристик // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2017. – Вып. 87. – С. 42-51. 6. Епифанов В.И. Технология обработки алмазов в бриллианты / В.И. Епифанов, А.Я. Песина, Л.В. Зыков. – М.: Высшая школа, 1984. – 319 с. 7. Чистяков Е.М. Инструмент из металлизированных сверхтвердых материалов / Е.М. Чистяков, А.А. Шепелев, Т.М. Дуда. – К.: Наукова думка, 1982. – 204 с. 8. Mamalis A.G. Ways of simulation-based improvement in the performance of diamond-abrasive tools / A.G. Mamalis, A.I. Grabchenko, V.A. Fedorovich, J. Kundrak, E.A. Babenko // Journal of Machining and Forming Technologies. – New York: Nova Publishers, 2012. – Vol. 4, Issue 1–2, p. 1–11.

Bibliography (transliterated): 1. Fedorovich V.A. Razrabotka nauchnyh osnov i sposobov prakticheskoy realizacii upravlenija prispособlivaemost'ju prialmaznom shlifovanii sverhtverdyh materialov: Dis. ... d-ra tehn. nauk: 05.03.01. – Har'kov, 2002. – 466 s. 2. Kozakova N.V. Opredelenie racional'nyh karakteristikalmaznyh krugov putem 3D modelirovaniya processov ih izgotovlenija i shlifovanija sverhtverdyh materialov: Dis. ... kand. tehn. nauk: 05.03.01. – Har'kov, 2005. – 210 s. 3. Grabchenko A.I., Fedorovich V.A. 3D modelirovanie processovalmazno-abrazivnoy obrabotki. – Har'kov: NTU «HPI», 2008. – 345 s. 4. Fedorovich V.A., Kozakova N.V. Vliyanie prochnosti jelementov sistemy «STM–zerno–svyazka» na jeffektivnost' shlifovanija / Visnik Nacional'nogo tehnicnogouniversitetu «Harkivsk'ij politehnicnij institut». – Harkiv: NTU «HPI». – 2003. – № 9, t. 1. – S. 85-92. 5. Grabchenko A.I., Fedorovich V.A., Ostroverh E.V., Kozakova N.V. Modelirovanie processa spekanijaalmaznyh krugov nametallicheskih svyazkah s cel'ju opredelenija ih racional'nyh karakteristik / Rezanie i instrument v tehnologicheskikh sistemah: Mezhdunar. nauch.-tehn. sb. – Har'kov: NTU «HPI», 2017. – Vip. 87. – С. 42-51. 6. Epifanov V.I., Pesina A.Ja., Zыkov L.V. Tehnologija obrabotkialmazov v brilliandy. – M.: Vysshaja shkola, 1984. – 319 s. 7. Chistjakov E.M., Shepelev A.A., Duda T.M. Instrument iz metallizirovannyh sverhtverdyh materialov. – K.: Naukova dumka, 1982. – 204 s. 8. Mamalis A.G., Grabchenko A.I., Fedorovich V.A., Kundrak J., Babenko E.A. Ways of simulation-based improvement in the performance of diamond-abrasive tools / Journal of Machining and Forming Technologies. – New York: Nova Publishers, 2012. – Vol. 4, Issue 1-2, p. 1-11.

УДК 621.922.34

М. М. Шейко, д-р техн. наук, А. П. Максименко, П. І. Бологов,
Київ, Україна

ПРАЦЕЗДАТНІСТЬ ПРАВЛЯЧОГО ІНСТРУМЕНТУ З ПРОТЕКЦІЄЮ АЛМАЗНО-ГАЛЬВАНІЧНОГО ПОКРИТТЯ

Показано, що протекція алмазно-гальванічного покриття (АГП) алмазним мікропорошком підвищує період стійкості правлячих роликів, виготовлених методом гальванопластики, на 90%, а період до повного руйнування АГП – на 125%.

Ключові слова: період стійкості, гальванопластика

Показано, что протекция алмазно-гальванического покрытия (АГП) алмазным микропорошком повышает период стойкости правящих роликов, изготовленных методом гальванопластики, на 90%, а период до полного разрушения АГП – на 125%.

Ключевые слова: период стойкости, гальванопластика

It is shown that the protection of the diamond-galvanic coating (AGP) with diamond micropowder increases the stability period of the dressing rollers, made by the electroforming method, by 90%, and the period before the complete destruction of the AGP by 125%.

Keywords: stability period, electroforming method

В роботі [1] для правлячих роликів прямого профілю АС200Т 400/315 було запропоновано і реалізовано метод протекції алмазно-гальванічного покриття (АГП) алмазним мікропорошком. Подальша робота присвячена стійкісним випробуванням і порівняльному аналізу роликів зі звичайним АГП і з АГП з протекцією. Контрольні зразки роликів було виготовлено з точно такими ж параметрами, але без протекції.

Випробування проводилося за методикою квазіврізної правки [2] абразивних кругів на спеціальному стенді на базі круглошліфувального верстата ЗБ151 з автономним приводом правлячого ролика. Для забезпечення умов роботи алмазного шару ролика таких, як при врізній правці, осьова подача S була, відповідно до [2], призначена рівній довжині L ділянки АГП, що випробовується. Швидкість абразивного круга (29 м/с) і ролика (14,6 м/с) відповідали режимам правки, застосовуваним в виробничих умовах. Заправлялися абразивні круги $\varnothing 600 \times 63 \times 305$ марки 24A25СМ2К5 при осьовій подачі $S = 3,35$ мм/об ($U = 61,8$ мм/с) і подачі на глибину $t_0 = 0,010$ мм.

Порівняльні випробування стійкості проводилися в однакових (для контрольного і посиленого роликів) умовах шляхом правки кругів на зазначених вище режимах. Періодично правка припинялася, випробовуваний ролик знімався з установки і вимірювався знос його АГП. На відміну від вагового методу вимірювання витрати алмазів (де в залік йшла вага і зношеної частини алмазів, і цілих вивалившисься з зв'язки зерен, і, можливо,

вага зношеної зв'язки) в нашому – метричному методі [3] – відстежувався лише абразивний знос алмазів, який зумовлює розмірну стійкість роликів до моменту виривання зерен з зв'язки. Суть методу полягала в тому, що робочий профіль роликів містив занижену – в нашому випадку на 1 мм – частину, що служила базою і не контактувала з заправляємим кругом в процесі основної роботи, а отже, не була піддана зносу (рис. 1, а). Відносно цієї бази вимірювався лінійний знос δ головної частині профілю. В силу дискретності робочої поверхні алмазного ролика, лінійний знос вимірювався опосередковано. Роликом з поточним зносом АГП за схемою врізної подачі заправлявся сторонній абразивний круг, на який, внаслідок цього, переносився профіль ролика. Сформований на кругі профіль, в свою чергу, за допомогою врізного шліфування переносився на пластинчастий свідок. Висота робочої ділянки профілю над базою на пластинчастому свідку замірялася на мікроскопі УИМ-21 з номінальною точністю ± 2 мкм. Від'ємний приріст цієї висоти між двома точками стійкісних випробувань інтерпретувався як лінійний знос АГП ролика за цей період. Лінійний знос δ сам по собі є найважливішим параметром, що характеризує розмірну стійкість правлячого інструменту, але традиційна питома витрата алмазів $Q_{\text{пит}}$ легко перераховувався за лінійним зносом за методикою [3].

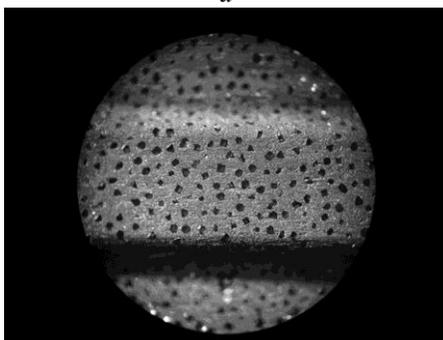
Ще один параметр зносу АГП – це питомий об'єм кишень в межзеренному просторі ω . Він обумовлював ступінь закладення алмазних зерен в нікелевій матриці роликів [4, 5]. В силу використання в сучасних правлячих інструментах алмазних порошків високих марок знос зв'язки став переважаючим фактором, що визначає стійкість цього інструменту.

Як і для лінійного зносу, змінення питомого об'єму кишень було встановлено як функцію об'єму диспергованого матеріалу шліфувальних кругів, що заправляються. В силу того, що правка проводилася за квазіврізною схемою [2], що імітує врізну правку, значення мав об'єм, приведений до одиниці довжини робочого профілю правлячого інструменту. Це очевидно, – адже, скажімо, два ролика, що розрізняються по довжині робочого профілю в 2 рази, але в усьому іншому – в тому числі по режимах правки – ідентичні, будуть зношуватися в однаковому темпі, не дивлячись на те, що більш широкий видалятиме в 2 рази більший об'єм. Отже, одиниця справленої «роботи», адекватна умовам правки, – це наведений об'єм диспергованого абразивного матеріалу кругів, що заправляються. Його розмірність – $\text{мм}^3/\text{мм}$. Для наочності було використано умовні одиниці. В якості однієї умовної одиниці (у.о.) було взято об'єм стандартного абразивного круга $\text{Ø}600 \times 63 \times 305$, приведений до його висоти (63 мм), тобто до довжини робочого профілю ролика, який заправляє його за врізною схемою;

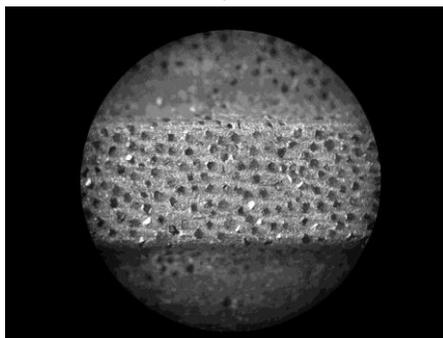
$$1 \text{ у.о.} = \frac{\pi}{4} (600^2 - 305^2) \cdot 63 / 63 = 2,097 \cdot 10^5 \text{ мм}^3/\text{мм}. \quad (1)$$



a



б



в

Рисунок 1 – Рабочая поверхность алмазного направляющего ролика в плане:
а) средняя часть, что выступает, как рабочая и две внешние занижены как базовые,
б) розкрита рабочая поверхность,
в) рабочая поверхность після диспергування 1 у.о. абразивного матеріалу

Метод квазіврезної правки не тільки дозволив імітувати врізну, але ще економити кількість використовуваних в експериментах кругів. Коефіцієнт використання круга, як показано в [2], в нашому випадку, коли довжина робочого профілю $L = 3,35$ мм, дорівнював

$$63 \text{ мм} / 3,35 \text{ мм} = 18,8. \quad (2)$$

Це означало, що диспергувавши в експерименті, скажімо, половину круга $\text{Ø}600 \times 63 \times 305$, випробований ролик в виробничих умовах видаляв би

$$\frac{1}{2} \cdot 1 \text{ у.е.} \cdot 18,8 = 9,4 \text{ у.е.},$$

тобто повних – до посадки (!) – 9,4 круга $\text{Ø}600 \times 63 \times 305$.

В результаті випробувань ролика без протекції було отримано наступні дані. Як і очікувалося, зі збільшенням об'єму x диспергованого матеріалу абразивних кругів, величина ω питомого об'єму кишень між алмазними зернами на робочій поверхні ролика мала тенденцію до стабілізації (рис. 2, а) і описувалася залежністю

$$\omega = (118 - 79 \cdot e^{-0,236x}) \cdot 10^{-3}, \quad \text{мм}^3 / \text{мм}^2. \quad (3)$$

Порівнюючи останній вираз з законом гідроабразивного зносу [4, 5]

$$\omega(x) = \omega_{\max} - (\omega_{\max} - \omega_0) \cdot e^{-kx}, \quad (4)$$

отримали числові значення для таких величин: початковий питомий об'єм кишень – $\omega_0 = 39 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^3 / \text{мм}^2$, гранична величина питомого об'єму – $\omega_{\max} = 118 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^3 / \text{мм}^2$ і коефіцієнт, пов'язаний з темпом зносу зв'язки, – $k = 0,236 \text{ у.е.}^{-1}$. Початковий об'єм ω_0 було забезпечено попереднім вскриттям робочої поверхні правлячого інструменту стороннім абразивним кругом. Такий об'єм кишень (рис. 1, б) ще не був оптимальним для ріжучої здатності ролика, але вже забезпечував розміщення шламу при правці і допустимий рівень сил різання. Зі збільшенням об'єму диспергованого матеріалу абразивних кругів об'єм кишень збільшувався (рис. 1, в), але темп зносу зв'язки сповільнювався (рис. 2, а). Як видно з графіка, при диспергуванні 3,7 у.о. питомий об'єм кишень ω досяг величини $85 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^3 / \text{мм}^2$. Це значення виявилось критичним. На наступному кроці експерименту, коли в сумі було дисперговано 5 у.о., робоча поверхня ролика втратила 50% алмазних зерен, кишень досягли $95 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^3 / \text{мм}^2$ і руйнування

АГП пішло лавиноподібно. Граничне значення $\omega_{\max} = 118 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^3/\text{мм}^2$, – взяте з емпіричної формули (3) і що за фізичним змістом характеризує стадію припинення росту кишень, коли досягається динамічна рівновага абразивного зносу алмазних зерен і гідроабразивного зносу зв'язки, – так і не було досягнуто. Таким чином, період стійкості правлячого ролика з АГП без протекції в вищевказаних умовах склав 3,7 у.о. диспергованого матеріалу, а період до повного руйнування АГП – близько 5 у.о.

Для ролика з протекцією графік зміни питомого об'єму кишень відрізнявся від кривої першого ролика і описувався виразом

$$\omega = (79 - 40 \cdot e^{-0,527 \cdot x}) \cdot 10^{-3}, \quad \text{мм}^3/\text{мм}^2. \quad (5)$$

По-перше, як видно з рис. 2, а, при практично тому ж початковому об'ємі кишень темп їх зростання – менше. По-друге, об'єм встиг досягти граничного значення $\omega_{\max} = 79 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^3/\text{мм}^2$. Це значення утримувалося протягом тривалого часу – практично протягом диспергування 11 у.о. матеріалу кругів. Перші поодинокі вириви алмазних зерен з робочої поверхні спостерігалися в момент сумарного диспергування 7 у.о., а масові вириви, коли було втрачено 40% зерен, в момент диспергування 11,2 у.о. абразивного матеріалу шліфувальних кругів. Після цього, як і для ролика без протекції, руйнування АГП відбулося лавиноподібно. Дані вказують на безсумнівне збільшення ресурсу правлячого інструменту на 90% (7 у.е./3,7 у.е. = 1,9) і збільшення його «витривалості», тобто періоду до повного руйнування АГП – на 125% (11,2 у.е./5 у.е. = 2,24).

Вимірювання лінійного зносу δ роликів по робочому профілю показало наступне. Зі збільшенням об'єму x диспергованого матеріалу знос зростав лінійно і з однаковим темпом як для АГП без протекції, так і з протекцією (рис. 2, б):

$$\delta = 2,0 \cdot x, \text{ мкм} . \quad (6)$$

По-перше, це вказувало на характер зносу штучних алмазних зерен через мікроскалування, коли характерна (для природних алмазів) площадка зносу не утворюється. По-друге, як зазначалося вище, тут враховувався убуток алмазів виключно за рахунок його зносу, а не за рахунок його виривання з зв'язки. Тому знос зв'язки і міцність утримання зерен (звичайно, на стадії, що передусє масовому вириванню зерен) не позначалися на розмірній стійкості інструменту; остання залежала тільки від міцності (марки) алмазного порошку, фізико-механічних характеристик кругів, що заправляються, та режимів правки.

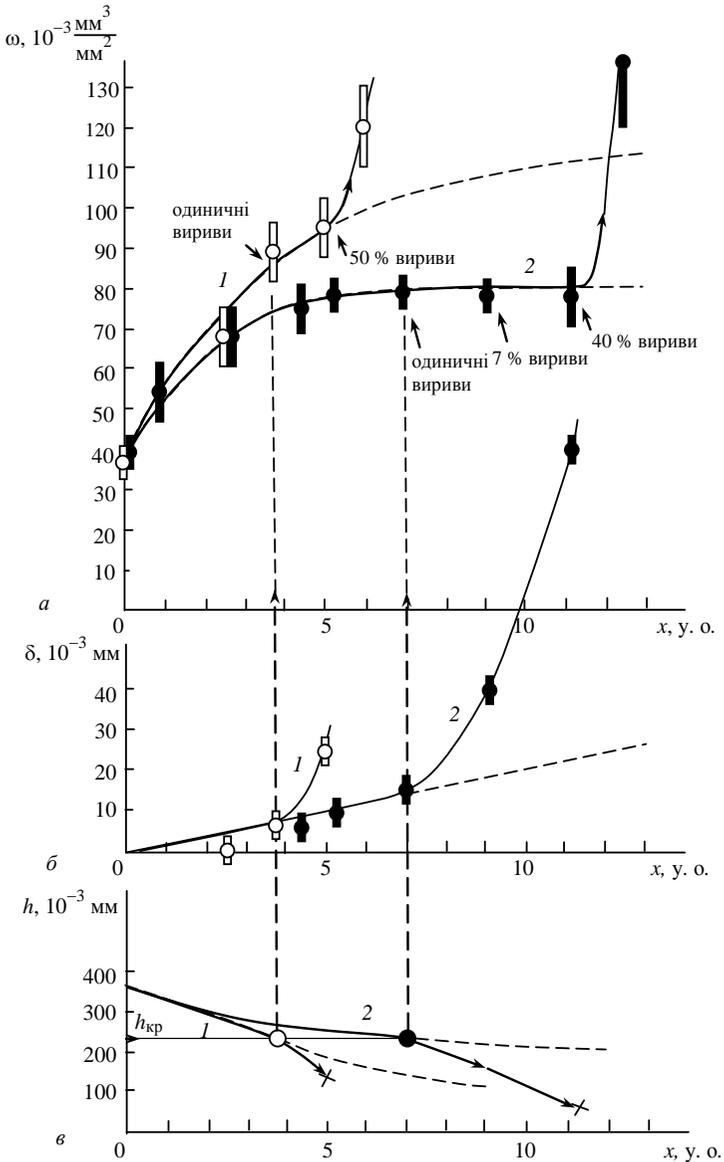


Рисунок 2 – Залежність питомої об'єму кишень (а), лінійного зносу алмазного шару (б) і середньої глибини закладення алмазного зерна (в) в інструменті з АГП без протекції (криві 1) та з протекцією (криві 2) від об'єму x диспергованого матеріалу

Як видно з графіка (рис. 2, б), для інструменту без протекції в момент диспергування 3,7 у.о. абразивного матеріалу, а для інструменту з протекцією – в момент 7 у.о., лінійна залежність змінюється на нелінійну, прогресивну. Це пояснюється початком виривів алмазних зерен, зменшенням числа зерен на робочій поверхні і, отже, збільшенням термо-силового навантаження на зерно і його більш інтенсивного розмірного зносу. Абсолютна величина лінійного зносу робочого профілю до кінця періоду стійкості по зносу зв'язки для інструмента без і з протекцією склала 7,4 мкм і 14 мкм відповідно. Зрозуміло, якщо технічне завдання на інструмент регламентує більш високу точність, його ресурс закінчується раніше. Але, з іншого боку, застосування алмазного порошку більш високих марок взагалі знімає питання розмірного зносу. Тому питання алмазоутримання і захисту вільної поверхні зв'язки від гідроабразивного зносу залишається (принаймні, для даних умов роботи) визначальним для збільшення періоду стійкості інструменту.

Для довідки було перераховано лінійний знос алмазів δ на традиційну питому витрату $Q_{\text{пит}}$:

$$Q_{\text{пит}} = \frac{\delta \cdot F \cdot n_c \cdot \pi \cdot d_p \cdot \gamma_a}{1 \text{ у.е.} \cdot \gamma_{\text{аб}}} =$$

$$= \frac{2 \cdot 10^{-3} \text{ мм} \cdot 8,78 \cdot 10^{-2} \text{ мм}^2 \cdot 6,0 \text{ мм}^{-2} \cdot \pi \cdot 125 \text{ мм} \cdot 3,5 \cdot 10^{-3} \text{ г/мм}^3}{2,097 \cdot 10^5 \text{ мм}^2 \cdot 2,13 \cdot 10^{-3} \text{ г/мм}^3} =$$

$$= 3,24 \cdot 10^{-6} \frac{\text{г}}{\text{г}} = 3,24 \frac{\text{мг}}{\text{кг}}, \quad (7)$$

де γ_a , $\gamma_{\text{аб}}$ – густина алмаза і абразивного круга, d_p – діаметр ролика, n_c

–питоме число алмазних зерен, $F = \frac{\pi}{6} d_v^2 = \frac{\pi}{6} (1,024 \cdot 0,4)^2 = 8,78 \cdot 10^{-2} \text{ мм}^2$ – середній переріз зерна.

Залишається вирішити питання про визначальний фактор, що обумовлює момент перших виривів алмазних зерен з робочої поверхні правлячого інструменту. Якщо для інструменту без протекції АГП цей момент відповідав об'єму кишень $\omega = 85 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^3/\text{мм}^2$, то для інструменту з протекцією – $79 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^3/\text{мм}^2$. Невже протекція мікропорошком послабила утримання зерен і вони виривалися при меншому зносі зв'язки? Чому ж тоді період стійкості такого інструменту збільшився на 90%? Звичайно ж ніякого послаблення нікелевої матриці не відбулося. Справа в тім, що для інструменту з протекцією на момент досягнення об'єму кишень $79 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^3/\text{мм}^2$ лінійний знос зерен досяг значення 14 мкм і вибрав частину величини закладення зерен у зв'язці. Дамо кількісні оцінки названих величин

і відстежимо їх функціональний зв'язок за допомогою аналізу найпростіших модельних уявлень.

Якщо через H позначити середню величину виступання (вильоту) зерна над зв'язкою, через h – середню глибину закладення зерна в зв'язці, через δ – як і вище, лінійний знос робочої частини зерна, а через d – діаметр зерна, що моделюється як куля (рис. 3), то очевидна рівність

$$d = \delta + H + h. \quad (8)$$

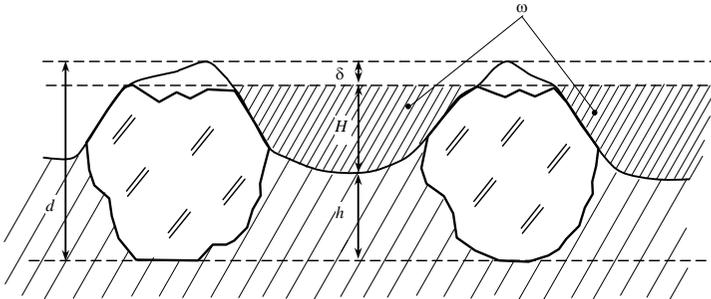


Рисунок 3 – До виводу зв'язку середніх величин лінійного зносу δ , вильоту над зв'язкою H і глибини закладення h в зв'язці алмазного зерна характерного розміру d

Питомий об'єм кишень як функція H і δ обчислюється за формулою

$$\omega(H, \delta) = H - \pi \cdot n_c \cdot \left((d - \delta) \delta H + \left(\frac{d}{2} - \delta \right) H^2 - \frac{1}{3} H^3 \right). \quad (9)$$

Підставляючи в (9) значення лінійного зносу δ як функції об'єму x диспергованого матеріалу круга (6) і прирівнявши отриманий вираз до виразу (4) питомого об'єму кишень як функції x , отримаємо рівняння щодо H . Це кубічне рівняння зручно розв'язувати чисельно. Отримаємо значення кореня як функцію об'єму диспергованого матеріалу $H = H(x)$. Далі знаходиться шукана середня величина глибини закладення

$$h(x) = d - H(x) - \delta(x). \quad (10)$$

Ця величина наведена (рис. 2, в) у вигляді двох кривих зміни середньої глибини закладення зерна: 1 – для інструменту без і 2 – для інструменту з протекцією. У критичних точках $x = 3,7$ у.е. і $x = 7$ у.е. криві 1 і 2 відповідно дають одне і те ж критичне значення глибини закладення $h_{кр} = 233 \cdot 10^{-3}$ мм. Це означає, що при такому закладенні, що складає 58% від висоти зерна

($d = 0,4$ мм), зерно виривається з матриці під дією поточних навантажень. (При більшому навантаженні на зерно – при відповідних режимах – критичне закладення буде більше, при менших – менше). Продовження кривих для x , більших критичних, накреслено пунктирною лінією, що відповідає лінійному закону зростання зносу алмазних зерен. Реальні криві, що відповідають нелінійному, прогресивному зростанню зносу, проведені суцільними зі стрілками; вони різко спускаються вниз. В точках $x = 5$ у.е. і 11,2 у.е. криві 1 і 2 відповідно обриваються, що відповідає повному руйнуванню АГП.

Таким чином, порівняльні стійкісні випробування алмазних правлячих роликів зі звичайним АГП і АГП з протекцією алмазним мікропорошком об'єктивно довели ефективність такої протекції. Ролики з захистом мають збільшений на 90% період стійкості і збільшений на 125% період до повного руйнування АГП. Крім того, на базі простих модельних уявлень про структуру алмазного шару правлячого інструменту теоретично відстежено динаміку зміни глибини закладення в зв'язці алмазних зерен, встановлено зв'язок цієї величини з характеристиками зносу зв'язки і алмазних зерен – з питомим об'ємом кишень і лінійним зносом відповідно.

Список використаних джерел: 1. *Шейко М. Н., Скок В. Н.* Формування алмазно-гальванічного покриття з протекцією алмазним мікропорошком в правячому інструменті // Сучасні технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. – Вип. 11. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – 324 с. – С. 233-244. 2. *Шейко М.Н., Пасичный О.О., Скок В.Н., Бологов П.И.* Квазиврезная правка абразивных кругов как экспресс-метод испытания алмазных фасонных роликов. Сообщение 1. Регистрация сил правки // Сверхтвердые материалы. – 2009. – № 4. – С. 65-75. 3. *Шейко М. Н.* Абразивный износ отдельных зерен в алмазных роликах и брусках при правке абразивных кругов и его связь с износом алмазов в инструменте в целом // Сверхтвердые материалы. – 2007. – № 6. – С. 58-64. 4. *Шейко М. Н., Маккевич В. П., Немец В. М., Скок В. Н.* Эволюция рабочей поверхности алмазных брусков в процессе врезной правки // Сучасні процеси механічної обробки інструментами с НТМ и якість поверхні деталей машин: Зб. наук. робіт (Серія Г "Процеси механічної обробки, верстати та інструменти") НАН України. ІНМ ім. В. М. Бакулія. – Київ, 2006. – С. 118-125. 5. *Шейко М. Н., Бородавко Д. Н., Скок В. Н.* Эволюция рабочей поверхности алмазных правящих брусков на стадии, предшествующей ее разрушению // Сверхтвердые материалы. – 2007. – № 2. – С. 65-72.

Bibliography (transliterated): 1. Shejko M. N., Skok V.N. Formuvannjaalmazno-gal'vanichnogo pokrittja z protekciejjualmaznim mikroporoshkom v pravjachomu instrumenti / Suchasni tehnologii v mashinobuduvanni: zb. nauk. prac'. – Vip. 11. – Harkiv: NTU «HPI», 2016. – 324 s. – S. 233–244. 2. Shejko M. N., Pasichnyj O. O., Skok V. N., Bologov P. I. Kvizivreznaja pravka abrazivnyh krugov kak jekspress-metod ispytanjajaalmaznyh fasonnyh rolikov. Soobshhenie 1. Registracija sil pravki / Sverhtverdye materialy. – 2009. – № 4. – S. 65-75. 3. Shejko M. N. Abrazivnyj iznos otdel'nyh zeren valmaznyh rolikah i bruskah pri pravke abrazivnyh krugov i ego svjaz' s iznosomalmazov v instrumente v celom / Sverhtverdye materialy. – 2007. – № 6. – S. 58-64. 4. Shejko M.N., Mackevich V.P., Nemeц V.M., Skok V.N. Jevoljucija rabochej poverhnostialmaznyh bruskov v processe vreznoj pravki / Suchasni procesi mehanichnoj obrabotki instrumentami s NTM i jakist' poverhni detalej mashin: Zb. nauk. robot (Serija G "Procesi mehanichnoj obrabotki, verstaty ta instrumenty") NAN Ukraini. INM im. V. M. Bakulja. – Kyiv, 2006. – S. 118-125. 5. Shejko M.N., Borodavko D.N., Skok V.N. Jevoljucija rabochej poverhnostialmaznyh pravjashhij bruskov na stadii, predshestvujushhej ee razrusheniju / Sverhtverdye materialy. – 2007. – № 2. – S. 65-72.

УДК 621.941.2

Эль-Дахаби Ф. В., канд. техн. наук,
Бейрут, Ливан

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ КОРПУСА ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ЗАЖИМНОГО ПАТРОНА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЧАСТОТАХ ВРАЩЕНИЯ

Виконані теоретичні дослідження показали, що стан поверхонь тертя, форма кулачка, стики кулачок-направляючі, зазори в опорі важеля, який зв'язує кулачок з компенсатором, істотно впливають на сумарну силу затиску, міцність і жорсткість високошвидкісного затискного патрона при різних частотах обертання.

Ключові слова: метод кінцевих елементів, корпус, патрон, напруги, деформації

Выполненные теоретические исследования показали, что состояние трущихся поверхностей, форма кулачка, стики кулачок-направляющие, зазоры в опоре рычага, связывающего кулачок с компенсатором, существенно влияют на суммарную силу зажима, прочность и жесткость высокоскоростного зажимного патрона при различных частотах вращения.

Ключевые слова: метод конечных элементов, корпус, зажимной патрон, напряжения, деформации

The theoretical studies have shown that the state of rubbing surfaces, the shape of the cam, the cam-rail joints, the gaps in the support of the lever connecting the cam to the compensator, significantly affect the total clamping force, strength and rigidity of the high-speed clamping chuck at various rotational speeds.

Keywords: Finite element method, chuck body, clamping chuck, stress, deformation

Введение

Метод конечных элементов (МКЭ) в последние десятилетия получил очень широкое распространение [1,7,8] и стал одним из основных методов анализа и расчета конструкций, в частности, зажимных механизмов, работающих на высоких частотах вращения и испытывающих большие динамические нагрузки [2-6]. Это обусловлено универсальностью подхода, лежащего в основе МКЭ, заключающегося в представлении геометрии любого деформируемого тела в виде совокупности элементов простейшей формы. Особенности МКЭ, обеспечивающими ему ведущее положение в прикладной вычислительной математике, стали следующие свойства [1]:

- универсальность – пригодность для решения самых разных задач математической физики;
- хорошая алгоритмизуемость – возможность разработки программных комплексов, охватывающих широкий круг прикладных задач;
- хорошая численная устойчивость МКЭ-алгоритмов.

Реализация МКЭ осуществляется системами инженерного анализа (CAE) [1]. Типичная схема использования таких систем в рамках концепции автоматизированного проектирования предусматривает создание электронной модели изделия. Эта электронная модель адекватно отражает требуемые конструктивные характеристики изделия и является главным источником информации. В качестве таких моделей выступают, как правило, трехмерные твердотельные и поверхностные геометрические модели.

Типичная схема построения современной системы конечно-элементного анализа представлена на рис. 1.



Рисунок 1 – Обобщенная структурная схема системы конечно-элементного анализа

Такая система имеет средства генерации геометрической модели, которые представлены в виде геометрического редактора с использованием геометрического ядра твердотельного моделирования.

Подготовка конечно-элементной модели по имеющимся геометрическим данным осуществляется препроцессором. При этом строится в автоматическом или ручном режиме адекватная конечно-элементная сетка, которая с требуемой точностью будет аппроксимировать поведение моделируемой системы. Подготовка конечно-элементной модели предусматривает также задание так называемых граничных условий – нагрузок, закреплений и т.п., определяющих анализируемую физическую задачу.

Следующим важнейшим элементом системы конечно-элементного анализа является модуль формирования системы линейных алгебраических уравнений и их последующего решения. Системы алгебраических уравнений решаются конечно-элементным процессором посредством прямых или итерационных методов. Результатами работы конечно-элементного процессора являются значения искомым целевых функций, таких как перемещения, напряжения и др.

Для всестороннего исследования результатов работы процессора используется постпроцессор системы конечно-элементных расчетов. Постпроцессор обладает набором удобных пользовательских функций, таких как анимация, отображение деформированного состояния, настраиваемые шкалы, многооконный интерфейс и др.

Сущность исследований

В качестве системы конечно-элементного анализа для исследования напряженно-деформированного состояния корпуса высокоскоростного зажимного патрона (ВСЗП) при различных частотах вращения использована система MSC Nastran for Windows.

Для полного цикла анализа напряженно-деформированного состояния корпуса ВСЗП включает следующие основные этапы [2, 4]: разработка геометрии корпуса ВСЗП; задание характеристик материалов элементов корпуса ВСЗП; выбор типов конечных элементов и ввод их параметров; разбиение корпуса ВСЗП на конечные элементы; задание граничных условий налагаемых на корпус ВСЗП; формирование системы нагрузок и задание их значений; проверка корректности разработанной модели; моделирование напряженно-деформированного состояния корпуса ВСЗП; анализ результатов моделирования и их представление.

Твердотельная модель корпуса ВСЗП (рис. 2) создана с использованием встроенного геометрического редактора. Характеристики материала корпуса патрона были введены в систему с использованием диалогового окна (рис. 3).

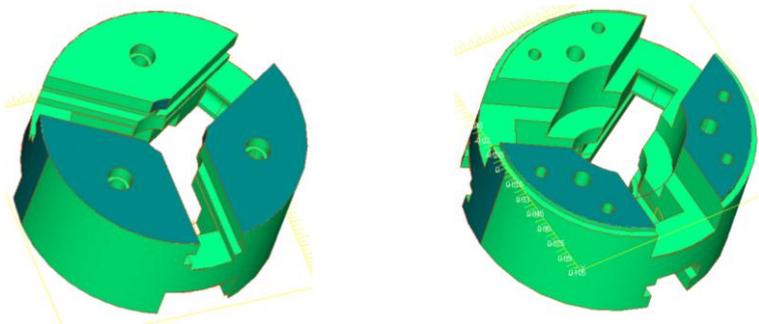


Рисунок 2 – Твёрдотельная геометрическая модель корпуса ВСЗП

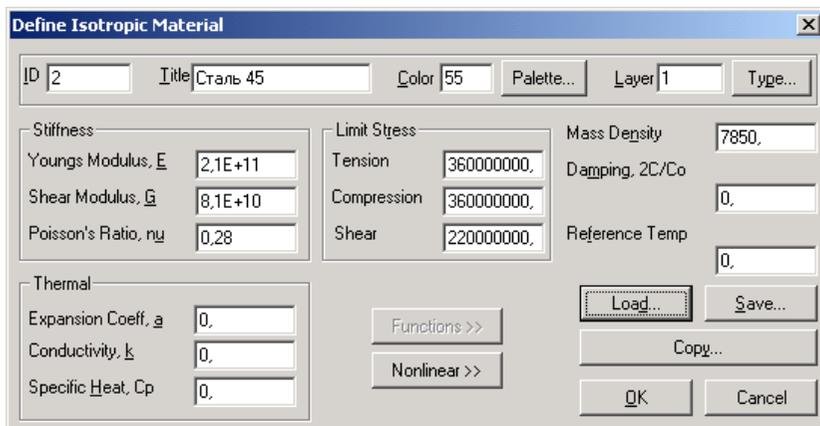


Рисунок 3 – Диалоговое окно ввода характеристик материала

Генерация конечно-элементной сетки осуществлялась автоматически с использованием опций управления параметрами конечно-элементной сетки, которые позволяют установить размер конечного элемента, корректировку сетки на сложных участках и др.

Геометрия анализируемой детали описана сеткой тетраэдральных конечных элементов (рис. 4). Используются десятиузловые тетраэдральные конечные элементы, которые обеспечивают второй порядок аппроксимации, что позволяет лучше аппроксимировать криволинейные границы и обеспечивает высокую точность расчета.

После создания конечно-элементной сетки заданы граничные условия, роль которых при статическом расчете выполняют закрепления и приложенные к корпусу ВСЗП нагрузки.

Результаты исследований

Моделирование напряженно-деформированного состояния осуществлялось в диапазоне частот вращения ВСЗП от 1000 об/мин до 11000 об/мин. Результатами моделирования корпуса ВСЗП, нагруженного силами инерции, вызванными кинематическим воздействием (рис. 6), являются эквивалентные напряжения и деформации элементов корпуса.

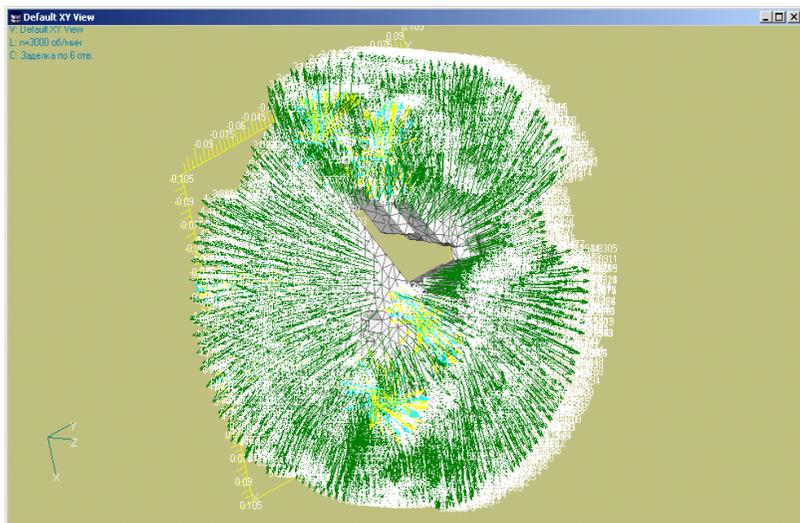


Рисунок 6 – Корпус ВСЗП с отображенными действующими силами инерции и реакциями связей

Значения эквивалентных напряжений рассчитывались по гипотезе энергии формоизменения Рихарда Фон Мизеса [10]:

$$\sigma_{\text{эке}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}, \quad (1)$$

где $\sigma_x = \sigma_{11}, \sigma_y = \sigma_{22}, \sigma_z = \sigma_{33}, \tau_{xy} = \sigma_{12}, \tau_{yz} = \sigma_{23}, \tau_{zx} = \sigma_{31}$ – компоненты тензора напряжений в рассматриваемой точке элемента корпуса ВСЗП.

Результаты моделирования напряженного состояния корпуса ВСЗП при частоте вращения $n = 3000$ об/мин представлены на рис. 7, где изображены элементы корпуса, которые испытывают наибольшие напряжения. На рис. 7 представлен также график расчетных величин эквивалентных напряжений по узлам конечно-элементной модели и напряжения в различных сечениях корпуса ВСЗП.

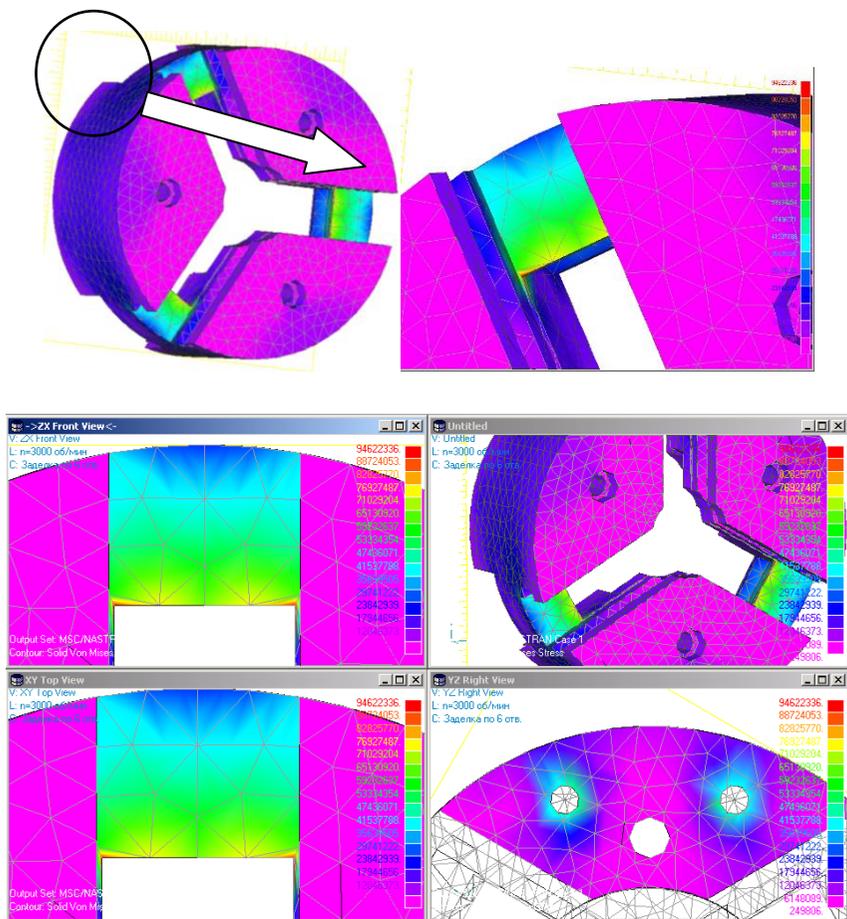


Рисунок 7 – Напряжения, возникающие в элементах корпуса патрона при $n = 3000$ об/мин

Аналогичным образом проведено моделирование при остальных частотах вращения.

Из полученных результатов следует, что наибольшие напряжения возникают в элементах корпуса между углублениями под рычаги перемещения кулачков и пазами кулачков. Это объясняется тем, что в результате выполнения пазов с направляющими кулачков ВСЗП получаются три консольные сегменты, которые в процессе вращения стараются под действием центробежных сил повернуться относительно условной плоскости их закрепления.

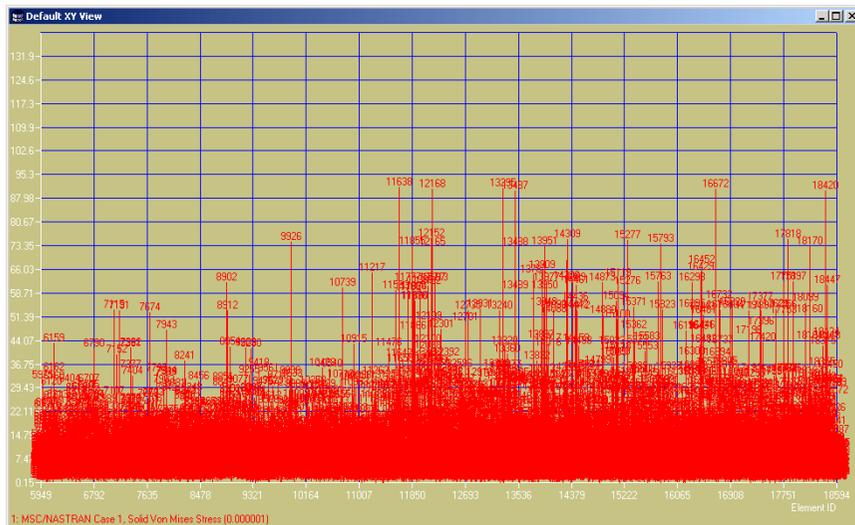


Рисунок 7 – Продолжение

В результате обработки данных за результатами моделирования получена зависимость максимальных напряжений, возникающих в элементах корпуса ВСЗП, в зависимости от частоты вращения (рис. 8).

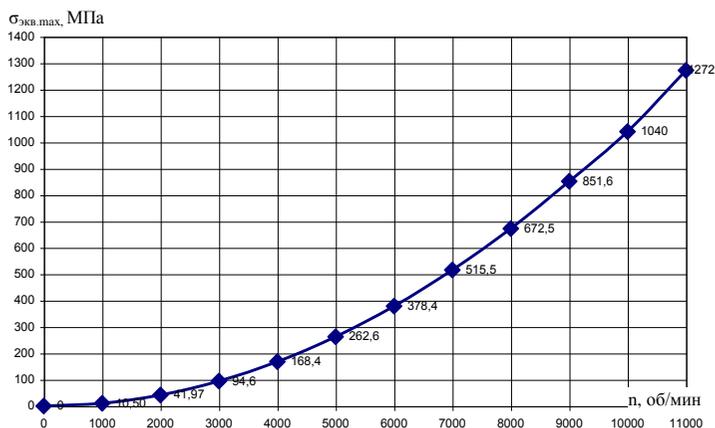


Рисунок 8 – Зависимость максимальных напряжений в корпусе ВСЗП, рассчитанных по гипотезе энергии формоизменения Рихарда фон Мизеса, от частоты вращения

Проведено также моделирование перемещений элементов корпуса ВСЗП при различных частотах вращения. На рис. 9 приведены картины возникающих деформаций и деформированное состояние корпуса ВСЗП, полученные в результате конечно-элементного расчета при $n = 5000$ об/мин.

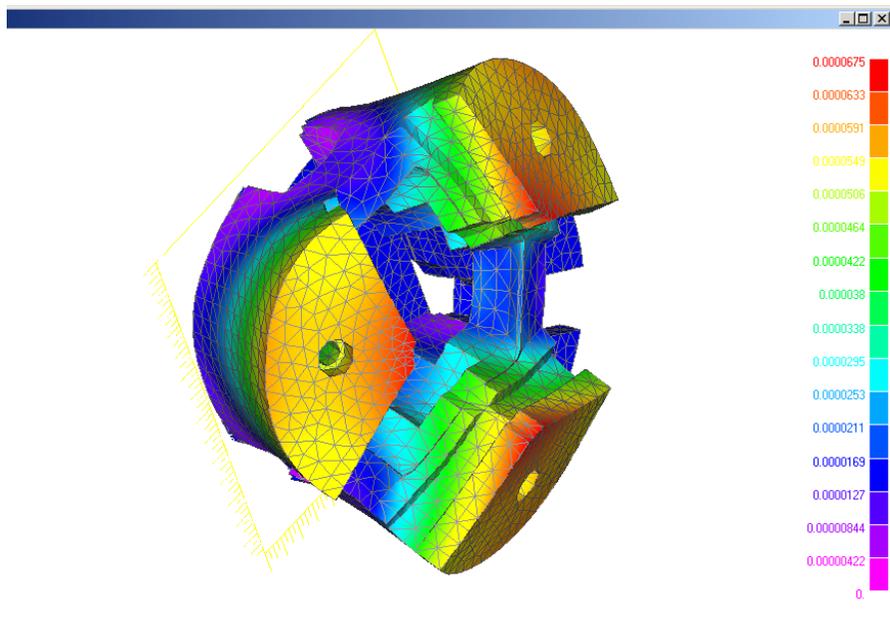


Рисунок 9 – Деформированное состояние корпуса ВСЗП при частоте вращения $n = 5000$ об/мин

Максимальные перемещения элементов корпуса ВСЗП, полученные в результате моделирования, приведены на рис. 10.

Из рис. 9, 10 следует, что изменение максимальных эквивалентных напряжений и перемещений элементов корпуса ВСЗП в зависимости от частоты вращения описывается квадратическими зависимостями, которые имеют вид:

$$\sigma_{\text{экв. макс}} = 1,048 \cdot 10^{-5} n^2. \quad (2)$$

$$\delta_{\text{макс}} = 2,698 \cdot 10^{-9} n^2. \quad (3)$$

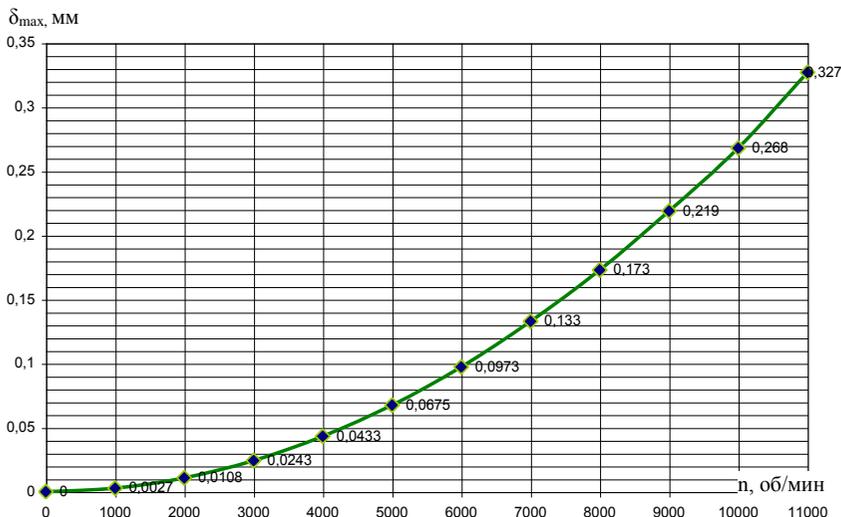


Рисунок 10 – Зависимость максимальных перемещений элементов корпуса ВСЗП от частоты вращения

Допустимая частота вращения ограниченная прочностью корпуса ВСЗП, изготовленного из различных марок сталей приведена в табл.1.

Таблица 1 – Допустимая частота вращения ограниченная прочностью ВСЗП изготовленного из различных марок сталей

Материал	$n_{доп}$, мин ⁻¹	Материал	$n_{доп}$, мин ⁻¹
Сталь 45	8950	Сталь 40ХН	9770
Сталь 40Х	9670	Сталь 45ХН2МФА	11770

Выводы

1. Теоретически установлено, что состояние трущихся поверхностей оказывает существенное влияние, например, увеличение коэффициента трения от 0,1 до 0,2 приводит к уменьшению силы зажима в 1,3 раза, в то время как длина направляющих кулачка в меньшей степени влияет на изменение силы зажима.

2. Установлено влияние формы кулачка на характер изменения силы зажима при вращении зажимного патрона без компенсации сил. Так, например, при использовании стандартных призматических стальных насадных кулачков типа KM-WBL-80 суммарная сила зажима становится равной нулю при $n_{max}=2035$ об/мин, а при использовании ступенчатых накладных кулачков типа SGB-j80 $=2450$ об/мин. Влияние формы кулачка

ещё более ощутимо при компенсации центробежных сил, так, например, использование компенсатора в виде уравновешивающего груза массой 1,3 кг приводит к увеличению частоты вращения при условии 2/3 потери силы зажима до 2610 мин^{-1} – при использовании призматических $n_{\text{max}} =$ накладных и кулачков до 6290 об/мин- при ступенчатых кулачках.

3. Предложенные аналитические зависимости для определения динамической радиальной силы зажима и коэффициента усиления позволяют для заданного типа кулачков подобрать оптимальную массу уравновешиваемого груза, при которой падение силы зажима практически отсутствует, а допустимая частота вращения ограничивается только прочностью элементов ВСЗП (корпуса, рычагов, зажимных кулачков и др.)

4. Установлено, что увеличение жесткости зажимаемой детали даже при наличии компенсатора приводит к значительному снижению динамической суммарной радиальной силы зажима. Так, например, при частоте вращения $n=3000$ об/мин и жесткости детали $j_p=100$ н/мкм сила $T_{\sum_{\text{ошн}}}^{\text{ком.п.н.}} = 27 \text{ кН}$, а при $j_p=400$ н/мкм снизилась почти в 2 раза до 14 кН. Детали, имеющие отверстия, с отношением внутреннего и наружного диаметров более 0,7 считаются нежесткими, из- за чего потеря зажимной силы в них значительно меньше и их обработка менее опасна.

5. Теоретические исследования показали, что увеличение стыков кулачков-направляющие и опоры рычага, связывающего кулачков с компенсатором, приводит к увеличению суммарной силы зажима и жёсткости ВСЗП в целом.

Список использованных источников: 1. *Зенкович О. К.* Метод конечных элементов в технике: Пер. с англ./ Под ред. Б.Е.Победр.-М.: Мир,1975. – 541с. 2. *Кузнецов Ю.Н., Волошин В.Н., Неделчева П.М., Эль-Дахаби Ф.В.* Зажимные механизмы для высокопроизводительной и высокоточной обработки резанием: монография / Под ред. Ю.Н.Кузнецова. – Габрово: Университетское издательство «Васил Априлов», 2010. – 724с. 3. *Кузнецов Ю.Н.* Зажимные механизмы и технологическая оснастка для высокоэффективной токарной обработки: монография / Ю.Н.Кузнецов, О.И.Драчев, И.В.Луцив, А.В.Шевченко, В.Н.Волошин.-Старый Оскол: ТНТ, 2014. – 480с. 4. *Кузнецов Ю.Н.* Динамика станочно-инструментальной оснастки для высокоэффективной токарной обработки: монография / Ю.Н.Кузнецов, О.И.Драчев, И.В.Луцив, А.В.Шевченко, В.Н.Волошин. – Старый оскол: ТНТ, 2015. – 432с. 5. *Кузнецов Ю.Н.* Принципы создания станочно-инструментальной оснастки для высокоэффективной токарной обработки: монография / Ю.Н.Кузнецов, О.И.Драчев, В.Н.Волошин – Старый Оскол: ТНТ, 2016.– 336с. 6. Самонастраивающиеся зажимные механизмы: Справочник /Ю.Н. Кузнецов, А.А. Вачев, С.П. Сяров, А.Й. Цървенков; под ред. Ю.Н. Кузнецова. – К.: “Техника”;София. Гос. из-во “Техника”; 1988. – 222с. 7. Michel Cazenave Méthode des éléments finis Approche pratique en mécanique des structures, L'usine nouvelle, Dunod 8. *Imbert, J.F.* Analyse des structures par éléments finis. s.l. : Cepadues, 1995. 9. *Batoz J.L., Dhatt G.* Modélisation des structures par élément finis – Vol. 3 – Coques. s.l. : Hermès, 1992. 10. *Timoshenko, S.P. et Gere, J.M.* Theory of Elastic Stability. s.l. : McGraw-Hill, 1963.

Bibliography (transliterated): 1. *Zenkovich O.K.* Metod konechnyh jelementov v tehnikе: Per. s angl./ Pod red. B.E.Pobedr. – M.: Mir,1975. – 541s. 2. *Kuznecov Ju.N., Voloshin V.N., Nedelcheva P.M.,*

Jel'-Dahabi F.V. Zazhimnye mehanizmy dlja vysokoproizvoditel'noj i vysokotočnoj obrabotki rezaniem: monografija / Pod red. Ju.N.Kuznecova. – Gabrovo: Universitetskoe izdatel'stvo «Vasil Aprilov», 2010. – 724s. 3. Kuznecov. Ju.N., Drachev O.I., Luciv I.V., Shevchenko A.V., Voloshin V.N. Zazhimnye mehanizmy i tehnologicheskaja osnastka dlja vysokojeffektivnoj tokarnoj obrabotki: monografija. – Staryj Oskol: TNT, 2014. – 480s. 4. Kuznecov Ju.N., Drachev O.I., Luciv I.V., Shevchenko A.V., Voloshin V.N. Dinamika stanochno-instrumental'noj osnastki dlja vysokojeffektivnoj tokarnoj obrabotki: monografija. – Staryj Oskol: TNT, 2015. – 432s. 5. Kuznecov Ju.N., Drachev O.I., Voloshin V.N. Principy sozdanija stanochno-instrumental'noj osnastki dlja vysokojeffektivnoj tokarnoj obrabotki: monografija. – Staryj Oskol: TNT, 2016. – 336s. 6. Samonstraivajushhejsja zazhimnye mehanizmy: Spravochnik /Ju.N. Kuznecov, A.A. Vachev, S.P. Sjarov, A.J. Crvenkov; pod red. Ju.N. Kuznecova. – K.: “Tehnika”;Sofija. Gos. iz-vo Tehnika; 1988. – 222s. 7. Michel Cazenave Méthode des éléments finis Approche pratique en mécanique des structures, L'usine nouvelle, Dunod 8. Imbert, J.F. Analyse des structures par éléments finis. s.l. : Cepadues, 1995. 9. Batoz J.L., Dhatt G. Modélisation des structures par élément finis – Vol.3 –Coques. s.l. : Hermès, 1992. 10. Timoshenko, S.P. et Gere, J.M. Theory of Elastic Stability. s.l.: McGraw-Hill,1963.

УДК 621.791

А.А. Якимов, д-р техн. наук, В.Г. Лебедев, д-р техн. наук,
Л.В. Бовнегра, канд. техн. наук, Н.Н. Клименко, канд. техн. наук,
С.В. Безнос, Одесса, Украина

ФОРМИРОВАНИЕ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ, РЕАЛИЗУЕМОЙ НА ОПЕРАЦИИ ШЛИФОВАНИЯ ПРЕРЫВИСТЫМИ КРУГАМИ

У статті розглянуті передбачувані закономірності зміни розмірів зерен металу в поверхневому шарі деталі, прошлифованої переривчастим кругом.

Ключові слова: температура шліфування, термоциклірування, переривчастий шліфувальний круг

В статье рассмотрены предполагаемые закономерности изменения размеров зерен металла в поверхностном слое детали, прошлифованной прерывистым кругом.

Ключевые слова: температура шлифования, термоциклирование, прерывистый шлифовальный круг

In the article the assumed dependencies of the change in the dimensions of the metal grains in the surface layer of the part, processed with a discontinuous grinding wheel, are considered.

Key words: grinding temperature, thermocycling, discontinuous grinding wheel

Введение

Измельчение зерна является одним из самых эффективных способов повышения характеристик прочности, т.к. не сопровождается охрупчиванием стали [1]. Циклическая термическая обработка является наиболее простым и экономичным способом получения сверхмелкого зерна в сталях [2]. Технология термоциклической обработки заключается в многократном воздействии (чаще всего от 4 до 7 раз) на стали ускоренным изменением температуры при нагревах и охлаждениях с целью быстрого и принудительного формирования структуры и получения нужных механических свойств. В практике промышленного производства наибольшее распространение получил следующий способ термоциклической обработки конструкционной и инструментальной сталей: 4-7-кратный ускоренный нагрев изделий до температур на 40-60 °С выше критической температуры перлит-аустенитного превращения (A_{c1}) с последующим охлаждением до температур на 40-60 °С ниже температуры обратного аустенит-перлитного превращения (A_{r1}).

Цель работы

Определение оптимальной технологии формирования свойств поверхностных слоев деталей при термоциклической обработке, реализуемой на операции шлифования прерывистыми кругами.

Основная часть

Известно, что при термоциклической обработке доэвтектоидных сталей можно добиться мелкозернистой структуры, обеспечивающей повышение эксплуатационных характеристик.

Если охлаждение с последнего нагрева производить на воздухе, то получается структура сверхмелкозернистой смеси феррита и перлита. Если охлаждение с последнего нагрева проводить в воде, то образуется сверхмелкозернистый мартенсит. Измельчение структуры дает резкое увеличение пластичности и вязкости сталей при сохранении или увеличении значений прочностных свойств [3, 4] (рис. 1).

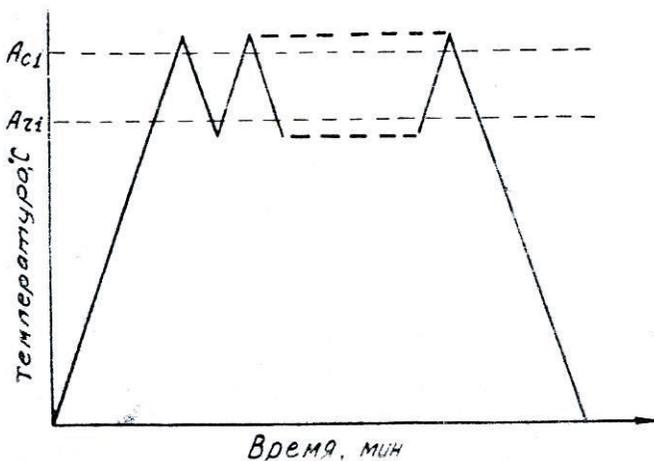


Рисунок 1 – Схема режима маятниковой термоциклической обработки

В работах [5, 6] показано, что у стали 45 полное измельчение зерен осуществляется за 5 циклов, при этом зерна с бальностью 5-6 в результате термоциклической обработки превращаются в зерна с бальностью 11-12. В работе [7] такая термоциклическая обработка названа маятниковой, так как температурный интервал термоциклирования находится вблизи температуры начала перекристаллизации. Изучением термоциклической обработки посвящены работы [8, 9, 10].

В работах [10, 11, 12] установлено, что температура A_{c1} зависит от скорости нагрева. Чем больше скорость нагрева, тем выше значение A_{c1} . Изменение температуры A_{r1} в зависимости от скорости охлаждения имеет противоположную закономерность. Чем больше скорость охлаждения, тем ниже значения A_{r1} (рис. 2) [10].

ρ , λ , c – плотность (кг/м³), теплопроводность (Дж/(м·с·°C)) и теплоемкость (Дж/(кг·°C)) обрабатываемого материала соответственно;

k – число режущих выступов, принявших участие в перерезании адиабатического стержня, расположенного по нормали к обрабатываемой

поверхности:
$$k = \frac{\sqrt{D_{кр} \cdot t}}{V_{дет}} \cdot \frac{V_{кр}}{(l'_1 + l'_2)}$$
;

l'_1 , l'_2 – длина режущего выступа и длина прорези (впадин) соответственно;

α – коэффициент температуропроводности обрабатываемого материала, м²/с, $\alpha = \lambda / (c \cdot \rho)$.

На рис. 3 приведены кривые, характеризующие кинетику нарастания температуры в точке обрабатываемой поверхности по мере удаления над ней металла отдельными режущими выступами круга, рассчитанные для трех разных режимов шлифования.

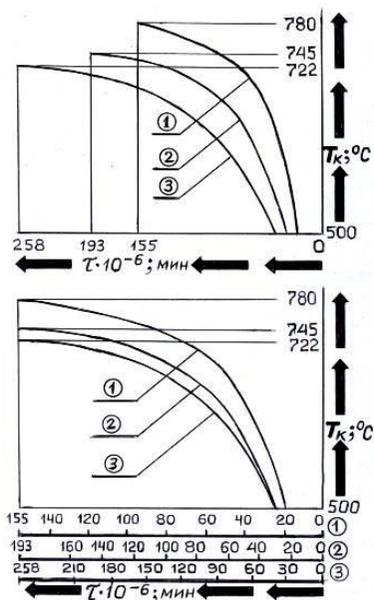


Рисунок 3 – Расчетные поверхностные температуры, формируемые при шлифовании плоских образцов из стали 45 прерывистым кругом ($l_1 = l_2 = 0,0277$ м, $n=14$) на режимах: $V_{кр}=30$ м/с, $t=6 \cdot 10^{-5}$ м, $V_{д}=15$ м/мин (режим №3), $V_{д}=20$ м/мин (режим №2), $V_{д}=25$ м/мин (режим №1)

На рис. 4 приведены осциллограммы температур, расшифровка которых показали что разность между наибольшими и наименьшими температурными всплесками в среднем равна разности температур ($A_{c1}+40\text{ }^{\circ}\text{C}$)-($A_{r1}-40\text{ }^{\circ}\text{C}$).

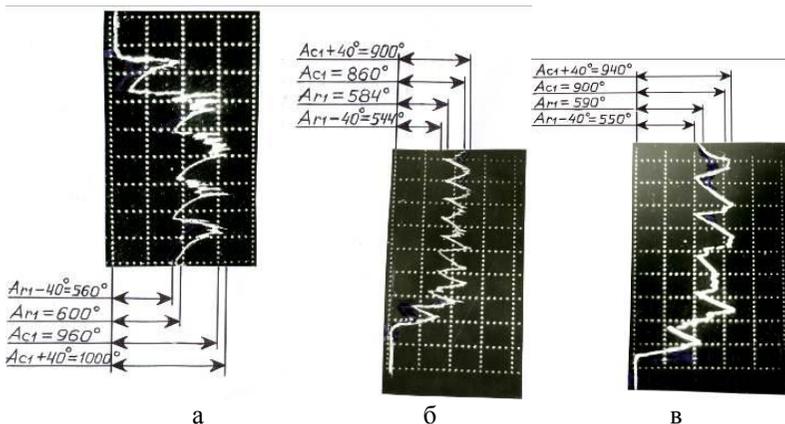


Рисунок 4 – Осциллограммы температур, полученных при шлифовании плоских образцов из стали 45 прерывистым кругом ПП 250x76x25 24А 25 СМ2 К6 с 14 впадинами протяженностью $l_2=0,0277\text{ м}$ (режущие выступы имеют ту же длину) на режимах: $V_{кр}=30\text{ м/с}$, $t=6\cdot 10^{-5}\text{ м}$, $V_{д}=15\text{ м/мин}$ (верхняя осциллограмма), $V_{д}=25\text{ м/мин}$ (нижняя осциллограмма) [12]

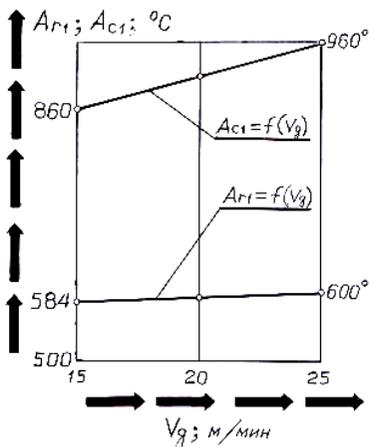


Рисунок 5 – Зависимости критических температур A_{c1} (перлит-аустенитного) и A_{r1} (обратного аустенит-перлитного) превращений от скорости перемещения теплового источника $V_{д}$ для стали 45

Выводы

1. Следует отметить, что скорости нагрева и охлаждения, которые имеют место при прерывистом шлифовании, несопоставимо выше скоростей, которые имеют место при обычной термообработке на измельчение зерна. Для приближения диапазона скоростей нагрева и охлаждения к тем, которые применяются при обычной термообработке, необходимо шлифовать с минимальными скоростями детали.

2. Кроме того, при прерывистом шлифовании обычно наблюдается общее снижение температуры, но металлографические исследования изменения размера зерен не обнаруживают. Предложенная методика нуждается в экспериментальной проверке и уточнении.

Список использованных источников: 1. Сметанина Т.С. Особенности формирования структуры аустенита при многократном нагреве в межкритический интервал температур / Т.С. Сметанина, С.А. Коковьякина // Перспективные процессы и технологии в машиностроительном производстве: Сб. тез. докл. Междунар. научн.-практ. конф. – Пермь: ПГТУ. – 2005. – С. 22. 2. Заяц Л.Ц. Повышение прочности низкоуглеродистых мартенситных сталей путем измельчения зерна при аустенизации / Л.Ц. Заяц, М.Г. Закирова, П. Быкова // перспективные процессы и технологии в машиностроительном производстве: Сб. тез. докл. Междунар. научн.-практ. конф. – Пермь: ПГТУ. – 2005. – С. 23-24. 3. Федюкин В.К. Опыт промышленного использования технологии термоциклической обработки металлов / В.К. Федюкин – Л.: ЛДНТП, 1982. – 18 с. 4. Федюкин В.К. Новые способы термоциклической обработки конструкционных сталей / В.К. Федюкин, В.К. Пустовойт – Л.: ЛДНТП, 1973. – 16 с. 5. Федюкин В.К. Закономерности и особенности фазовых превращений при термической обработке и ее влияние на надежность изделий из сталей перлитного класса / В.К. Федюкин – Л.: ЛДНТП, 1974. – 29 с. 6. Федюкин В.К. Метод термоциклической обработки металлов / В.К. Федюкин – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1984. – 192 с. 7. Федюкин В.К. Термоциклическая обработка металлов и деталей машин / В.К. Федюкин, М.Е. Смагоринский – Л.: Машиностроение, 1989. – 255 с. 8. Легкостаев Ю.Л. Влияние термоциклической обработки на структуру и свойства стали 12Х2МФ / Ю.Л. Легкостаев, А.О. Соколов, В.Г. Хорошилов // Вопросы судостроения: Сб. науч. тр. (Серия «Металловедение, металлургия») – Л., 1985. – Вып. 43. – С. 37-42. 9. Илларионов Э.И. О влиянии термоциклической обработки на прочностные свойства стали 30ХГСА / Э.И. Илларионов // термоциклическая обработка металлических изделий: Сб. науч. трудов. – Л., 1982. – С. 71-73. 10. Блантер М.Е. Теория термической обработки / М.Е. Блантер. – М.: Металлургия, 1984. – 315 с. 11. Лебедев В.Г. Кинетика изменения температур критических точек при шлифовании закаливаемых сталей / В.Г. Лебедев, Н.Н. Клименко // труды Одесского политехнического университета: науч. и произ.-практ. сб. – Одесса: ОНПУ, 2000. – Вып. 3(12). – С. 42-44. 12. Якимов О.О. Технологічне забезпечення якості поверхневого шару зубів високоточних зубчастих коліс при шліфуванні: дис. докт. техн. наук: 05.02.08. Захищена 05.03.2015/ Якімов Олександрович. – Одеса. 2015. – 465 с. 13. Якимов А.А. Термоциклирование при прерывистом шлифовании / А.А. Якимов // Ресурсо- и энергосберегающие технологии в машиностроении: тезисы докл. науч.-техн. конф. – Киев: Общество «Знание» Украины. – 1994. – С. 121-122. 14. Усов А.В. Способ шлифования плоских поверхностей / А.В. Усов, А.А. Якимов // А.С. 1683982, СССР. МКИ В 24 В 7/00. – № 4644298/08; Заявл. 31.01.89; Опубл. 15.10.91, Бюл. №38. – 2 с.

Bibliography (transliterated): 1. Smetanina T.S., Kokovjakina S.A. Osobennosti formirovaniya struktury austenita pri mnogokratnom nagreve v mezhkriteskij interval temperatur / Perspektivnye processy i tehnologii v mashinostroitel'nom proizvodstve: Sb. tez. dokl. Mezhdunar. nauchn.-prakt. konf. – Perm': PGTU. – 2005. – S. 22. 2. Zajac L.C., Zakirova M.G., Bykova P. Povyshenie prochnosti nizkouglerodistykh martensitnykh stalej putem izmel'chenija zerna pri austenizacii / Perspektivnye

processy i tehnologii v mashinostroitel'nom proizvodstve: Sb. tez. dokl. Mezhdunar. nauchn.-prakt. konf. – Perm': PGTU. – 2005. – S. 23-24. 3.Fedjukin V.K. Opyt promyshlennogo ispol'zovaniya tehnologii termociklicheskoj obrabotki metallov. – L.: LDNTP, 1982. – 18 s. 4. Fedjukin V.K., Pustovojt V.K. Novye sposoby termociklicheskoj obrabotki konstrukcionnyh stalej. – L.: LDNTP, 1973. – 16 s. 5.Fedjukin V.K. Zakonomernosti i osobennosti fazovyh prevrashhenij pri termicheskoj obrabotke i ee vlijanie na nadezhnost' izdelij iz stalej perlitnogo klassa. – L.: LDNTP, 1974. – 29 s. 6.Fedjukin V.K. Metod termociklicheskoj obrabotki metallov. – L.: Izd-vo Leningr. un-ta, 1984. – 192 s. 7. Fedjukin V.K., Smagorinskij M.E. Termociklicheskaja obrabotka metallov i detalej mashin. – L.: Mashinostroenie, 1989. – 255 s. 8. Legkostaev Ju.L., Sokolov A.O., Horoshijlov V.G. Vlijanie termociklicheskoj obrabotki na strukturu i svojstva stali 12H2MF / Voprosy sudostroenija: Sb. nauch. tr. (Serija «Metallovedenie, metallurgija»). – L., 1985. – Vyp. 43. – S. 37-42. 9.Illarionov Je.I. O vlijanii termociklicheskoj obrabotki na prochnostnye svojstva stali 30HGSA / Ttermociklicheskaja obrabotka metallicheskih izdelij: Sb. nauch. trudov. – L., 1982. – S. 71-73. 10.Blanter M.E. Teorija termicheskoj obrabotki. – M.: Metallurgija, 1984. – 315 s. 11. Lebedev V.G., Klimenko N.N. Kinetika izmenenija temperatur kriticheskikh toček pri shlifovanii zakalivaemyh stalej /Trudy Odesskogo politehnicheskogo universiteta: nauch. i proiz.-prakt. sb. – Odessa: ONPU, 2000. – Vyp. 3(12). – S. 42-44. 12. Tehnologichne zabezpechennja jakosti poverhnevnogo sharu zubiv visokotochnih zubchastih kolis pri shlifuvanni: dis. dokt. tehn. nauk: 05.02.08. Zahishhena 05.03.2015/ Jakimov Oleksij Oleksandrovich. – Odesa. 2015. – 465 s. 13.Jakimov A.A. Termociklirovanie pri preryvistom shlifovanii / Resurso- i jenergosberegajushhie tehnologii v mashinostroenii: tezisy dokl. nauch.-tehn. konf. – Kiev: Obshhestvo «Znanie» Ukrainy. – 1994. – S. 121-122. 14. Usov A.V., Jakimov A.A. Sposob shlifovanija ploskih poverhnostej / A.S. 1683982, SSSR. MKI V 24 V 7/00. – № 4644298/08; Zajavl. 31.01.89; Opubl. 15.10.91, Bjul. №38. – 2 s.

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Агу Коллинз Агу, Узунян М. Д.</i> Исследование и анализ оптимального состава твёрдого смазочного материала при алмазно-искровом шлифовании твёрдых сплавов.....	3
<i>Антонюк В. С., Гайдаш Р. П., Білокінь С. О., Бондаренко Ю. Ю., Бондаренко М. О.</i> Модифікація нанорельєфу методом електронно-променевої мікрообробки.....	11
<i>Витязев Ю. Б., Гаращенко Я. М.</i> Рациональная ориентация изделия при его послыном формообразовании на основе статистического анализа исходной триангуляционной 3D модели	18
<i>Гасанов М. И.</i> Твердосплавные червячные фрезы после алмазной заточки для восстановления крупногабаритных зубчатых колес	32
<i>Гуцаленко Ю. Г., Івкін В. В., Пупань Л. И., Севидова Е. К., Степанова И. И.</i> Электроизоляционные анодно-искровые покрытия алюминиевых посадочных поверхностей алмазных шлифовальных кругов	43
<i>Доброскок В. Л., Островерх Е.В., Наконечный Н.Ф., Витязев Ю.Б.</i> Классификация интегрированных процессов механической обработки материалов	51
<i>Katrak O.</i> The analysis of dynamic phenomena in technological system at milling case details	74
<i>Козакова Н.В., Крижний Г.К., Островерх Є.В.</i> Підготовка фахівців спеціалізації «Стандартизація, сертифікація та управління якістю продукції» в НТУ «ХПІ»	82
<i>Кузнецов Ю.М., Придальний Б.І., Гайдаєнко Ю.В.</i> Затисковый патрон із зовнішнім електромеханічним приводом.....	88
<i>Kundrák J., Varga G., Nagy A., Makkai T.</i> Examination of 2D and 3D surface roughness parameters of face milled aluminium surfaces	94
<i>Kundrák J., Molnár V., Deszpoth I., Makkai T.</i> Effect of cutting data selection on productivity in face milling	101
<i>Ларшин В.П., Лищенко Н.В.</i> Имитационное моделирование припуска на зубошлифование	107

<i>Лебедев В.Г., Фроленкова О.В.</i> Контактные температуры при шлифовании термобарьерного покрытия ZrO_2 кругами из синтетических сверхтвердых материалов	118
<i>Лиценко Н.В.</i> Разработка имитационной модели припуска на основе теоретико-вероятностного подхода	124
<i>Некрасов С.С., Довгополов А.Ю.</i> Дослідження міцності роз'ємного різьбового з'єднання з великим кроком в деталях з армованих композиційних матеріалів	135
<i>Новиков Ф.В., Гуцаленко Ю.Г., Полянский В.И., Ивкин В.В.</i> Механика и производительность алмазного шлифования с учетом износа зерен круга	142
<i>Новиков Ф.В., Гуцаленко Ю.Г., Янку К.Г., Кленов О.С.</i> Влияние макро- и микромеханики резания на теплонапряженность процесса шлифования	158
<i>Пермяков А.А., Ищенко М.Г., Шепелев Д.К.</i> Компоновки мобильных станков для ремонта недемонтируемых деталей и узлов турбоагрегатов	166
<i>Посвятенко Е.К., Аксьом П.А., Посвятенко Н.І.</i> Вплив попередньої холодної деформації і рослинних мастильно-охолоджуючих рідин на фізико-механічні та технологічні властивості аустенітних сталей	172
<i>Пыжов И. Н.</i> Особенности самозатачивания алмазных кругов на органических связках при шлифовании ПСТМ	179
<i>Пыжов И. Н., Федорович В. А., Волошкина И. В.</i> Силовые характеристики процесса шлифования ПСТМ в режиме самозатачивания алмазных кругов	193
<i>Рязанова-Хитровская Н.В., Федорович В.А., Пыжов И.Н.</i> Моделирование инструмента для процесса выглаживания	204
<i>Тіхенко В.М.</i> Реалізація електроерозійного шліфування для обробки деталей штампів на плоскошліфувальному верстаті	212
<i>Тонконогий В.М., Сіньковський А.С., Рибак О.В.</i> Аналіз характеристик композиційних порошків для плазмового напилювання на основі $TiC - Ni(P) - Cu$ при розробці САПР ТП шліфування покриттів	216

Федорович В.А., Островерх Е.В., Козакова Н.В. Определение оптимального сочетания компонентов в спекаемом слое алмазно-абразивного инструмента	224
Шейко М. М., Максименко А. П., Бологов П. І. Працездатність правлячого інструменту з протекцією алмазно-гальванічного покриття.....	236
Эль-Дахаби Ф. В. Анализ напряженного состояния корпуса высокоскоростного зажимного патрона при различных частотах вращения	245
Якимов А.А., Лебедев В.Г., Бовнегра Л.В., Клименко Н.Н., Безнос С.В. Формирование свойств поверхностных слоев деталей при термоциклической обработке, реализуемой на операции шлифования прерывистыми кругами	257

Наукове видання

**РІЗАННЯ ТА ІНСТРУМЕНТИ
в технологічних системах**

Міжнародний науково-технічний збірник

Випуск 88

Укладач *проф. А. І. Грабченко*
Оригінал-макет *Н. В. Крюкова*
В авторській редакції

Матеріали відтворено з авторських оригіналів

Підп до друку . .2018 р. Формат 60 × 84 1/16. Папір офсетний.
Riso-друк. Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 10,8. Наклад 300 пр., 1-й з-д 1–20.
Зам. № . Ціна договірна.

Виготовлювач Видавничий цент НТУ «ХП»,
вул. Кирпичова, 2, м. Харків-2, 61002

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3657 від 24.12.2009 р.