



Асоціація технологів-машинобудівників України  
Академія технологічних наук України  
Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля  
НАН України

Український державний університет залізничного  
транспорту

ТОВ «ТМ.ВЕЛТЕК»

ПАТ «Ільницький завод механічного зварювального  
обладнання»

Інститут металургії та матеріалознавства ім. О.О. Байкова

Інститут прикладної фізики НАН Білорусі

Білоруський національний технічний університет

Машинобудівний факультет Белградського університету

Видавництво «Іноваційне машинобудування»

## **СУЧАСНІ ПИТАННЯ ВИРОБНИЦТВА ТА РЕМОНТУ В ПРОМИСЛОВОСТІ І НА ТРАНСПОРТІ**

**Матеріали 21-го Міжнародного  
науково-технічного семінару**

*(15–19 березня 2021 р., м. Львів)*

Київ – 2021

**Сучасні питання виробництва та ремонту в промисловості і на транспорті:** Матеріали Міжнародного науково-технічного семінару, 15–19 березня 2021 р., м. Львів. – Київ: АТМ України, 2021. – 150 с.

Тематика семінару:

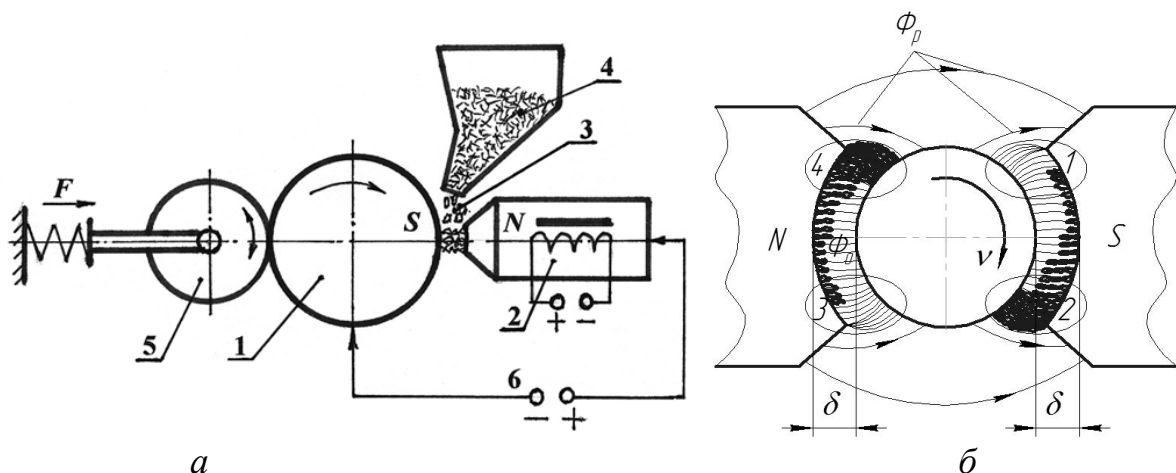
- Сучасні тенденції розвитку технології машинобудування
- Підготовка виробництва як основа створення конкурентоспроможної продукції
- Стан і перспективи розвитку заготівельного виробництва
- Удосконалення технологій механічної та фізико-технічної обробки в машино- і приладобудуванні
- Ущільнюючі технології та покриття
- Сучасні технології та обладнання в складальному і зварювальному виробництві
- Ремонт і відновлення деталей машин у промисловості і на транспорті, обладнання для виготовлення, ремонту і відновлення
- Стандартизація, сертифікація, технологічне управління якістю та експлуатаційними властивостями виробів машино- та приладобудування
- Впровадження стандартів ДСТУ ISO 9001 у промисловості, вищих навчальних закладах, медичних установах і органах державної влади
- Метрологія, технічний контроль та діагностика в машино- і приладобудуванні
- Екологічні проблеми та їх вирішення у сучасному виробництві

**Матеріали представлені в авторській редакції**

© АТМ України,  
2021 р.

## УПРОЧНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ КОМПЛЕКСНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО И МАГНИТНОГО ПОЛЕЙ

Задача упрочнения (восстановления) поверхностей деталей состоит в придании новых физико-механических свойств поверхностному слою путем его модифицирования или нанесения покрытий на поверхность металла основы. Известно, что одним способом упрочнения невозможно обеспечить одновременное повышение нескольких эксплуатационных свойств поверхностного слоя, так как один и тот же материал покрытия, нанесенного разными способами, обладает различными эксплуатационными свойствами. Поэтому каждая упрочняющая технология имеет свою рациональную область применения. Одним из вариантов решения данной проблемы является создание комбинированных методов, основанных на совмещении энергетического воздействия и финишной обработки. Например, технологии магнитно-электрического упрочнения (МЭУ) и магнитно-абразивной обработки (МАО) (рис. 1) могут быть совмещены на одном оборудовании [1].



**Рис. 1 – Схемы магнитно-электрофизической обработки наружных цилиндрических поверхностей в магнитном поле МЭУ (а) и МАО (б)**  
1 – заготовка, 2 – электромагнит, 3 – ферромагнитный порошок, 4 – бункер-дозатор ФМП, 5 – деформирующий инструмент, б – источник разрядного тока  
Зоны формирования: 1, 3 – цепочек из зерен ФМП, 2, 4 – абразивной щетки,  $\Phi_0$  – основной магнитный поток,  $\Phi_p$  – поток рассеивания,  $\delta$  – рабочие зазоры

Электромагнитные потоки просты в реализации и удобны в управлении, что является важным при создании установок для комбинированной упрочняюще-размерной технологии, сочетающей высокоэнергетические и механические воздействия, например, использование при последующем поверхностном пластическом деформировании тепла, выделяемого от электрических разрядов МЭУ (рис. 1, а).

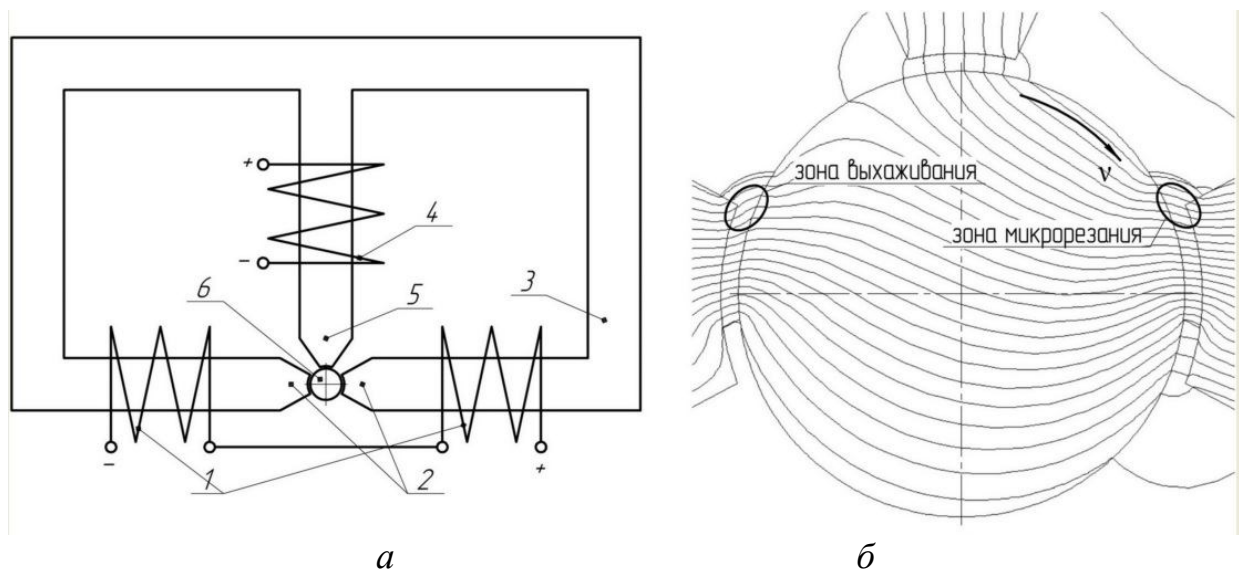
К преимуществам МЭУ относятся высокая прочность сцепления покрытия с основой и отсутствие термической деформации [2]. Достоинством МАО является возможность управления плотностью и жесткостью режущего инструмента (рис. 1, б, зоны 2 и 4) из ферроабразивных зерен (ФАЗ), что обеспечивает шероховатость обрабатываемых поверхностей  $Ra$  0,02–0,16, снижение волнистости в 8–10 раз и гранности до 2-х раз [3].

Эксперименты проводили на образцах из стали 30ХГС (ГОСТ 4543-71), представляющих собой кольца с наружным диаметром 40 мм, внутренним – 16 мм и высотой 12 мм. Образцы подвергали нормализации и обрабатывали до достижения шероховатости поверхности  $Ra$  12,5 мкм. При МЭУ использовали инверторный источник питания модели «Invertec V270 T».

Для обеспечения геометрических показателей точности поверхность после МЭУ была обработана шлифованием и последующей МАО.

При классической схеме МАО ферроабразивные зерна ориентированы перпендикулярно обрабатываемой поверхности. В таком положении угол резания каждого зерна ФАЗ превышает  $90^\circ$ , а передний угол является отрицательным. Известно, что при увеличении угла резания процесс снятия стружки затухает, переходит в процесс трения по обрабатываемой поверхности, что снижает производительность обработки и ухудшает шероховатость поверхности. То есть, при МАО целесообразно изменять угол наклона оси ФАЗ относительно обрабатываемой поверхности.

Использование дополнительной магнитной системы (рис. 2, а, позиция 4) позволяет путем суперпозиции основного и дополнительного магнитных полей изменять топографию магнитного поля и адекватно ей угол наклона наибольшей оси ФАЗ относительно обрабатываемой поверхности. Изменение наклона ферроабразивных зерен создает у входа в рабочий зазор зону интенсивного микрорезания, а у выхода из рабочего зазора – зону выхаживания (рис. 2, б).



**Рис. 2 – Схема МАО с дополнительной магнитной системой (а); топография магнитного поля в рабочем зазоре (б):**  
 1, 4 – катушки электромагнитов; 2, 5 – полюсные наконечники;  
 3 – магнитопровод; 6 – заготовка

Согласно принципу суперпозиции магнитных полей, суммарное магнитное поле в заданной точке рабочего зазора, создаваемое несколькими источниками, равно сумме векторов каждого из них. Применение дополнительной магнитной системы для управления наклоном силовых магнитных линий в рабочем зазоре позволяет переместить абразивную щетку в зону входа в рабочий зазор и сориентировать ФАЗ таким образом, чтобы получить у них положительные передние углы ( $+\gamma$ ). Кроме этого, имеется возможность плавно регулировать угол наклона силовых линий путем изменения величины магнитной индукции, генерируемой дополнительной магнитной системой, что позволяет управлять интенсивностью резания и шероховатостью поверхности. Установлено, что изменение величины угла наклона  $\omega$  силовых линий в рабочем зазоре описывается уравнением

$$\omega = -9,8214B_{\text{д}}^2 + 18,804B_{\text{д}} + 41,615,$$

где  $B_{\text{д}}$  – величина индукции магнитного поля в рабочем зазоре дополнительной магнитной системы, Тл.

Компьютерным моделированием установлено [4], что изменение величины индукции дополнительной магнитной системы позволяет изменять угол наклона силовых линий магнитного поля по периметру рабочего зазора (от входа в него до центра) в пределах от  $43^\circ$  до  $85^\circ$ . Однако его величина ограничена предельным значением индукции основного магнитного поля, поскольку при ее пре-

вышении у одноименных полюсов происходит отсечение ветви магнитопровода и суммарный магнитный поток замыкается по ветви с разноименными полюсами, т.е. должно соблюдаться условие  $B_d < B_0$ , где  $B_0$  – величина магнитной индукции основной магнитной системы, Тл.

Условия проведения МАО: магнитная индукция основной магнитной системы  $B_0 = 0,9$  Тл; магнитная индукция дополнительной магнитной системы  $B_d = 0,1$  Тл; рабочий зазор основной магнитной системы  $\delta_0 = 1$  мм; рабочий зазор дополнительной магнитной системы  $\delta_d = 1,5$  мм; зернистость ферроабразивного порошка FeTiC  $\Delta = 100\text{--}160$  мкм; скорость главного движения  $v = 0,9$  м/с. Измерение шероховатости поверхности производилось на профилографе-профилометре *Mitutoyo SJ-201P*.

Анализ экспериментальных данных показал, что уменьшение угла резания в рабочем зазоре снижает шероховатость поверхности по параметру  $Ra$  на 25%. Установлено, что износостойкость покрытий из ферромагнитного порошка ФБХ-6-2, сформированных МЭУ с последующим шлифованием и МАО в 1,7 – 1,9 раза выше износостойкости эталона из термообработанной стали 45.

## Литература

1. Обработка и упрочнение поверхностей при изготовлении и восстановлении деталей / под общ. ред. М.Л. Хейфеца и С.А. Клименко. – Мн. : Беларуская навука, 2013. – 463 с.

2. Акулович, Л.М. Магнитно-электрическое упрочнение поверхностей деталей сельскохозяйственной техники / Л.М. Акулович, А.В. Миранович. – Мн. : БГАТУ, 2016. – 236 с.

3. Финишная обработка поверхностей при производстве деталей / под общ. ред. С.А. Чижика и М.Л. Хейфеца. – Мн. : Беларуская навука, 2017. – 376 с.

4. Акулович, Л.М. Упрочняющая магнитно-абразивная обработка поверхностей с управлением процессом резания / Л.М. Акулович, О.Н. Ворошуха // [Упрочняющие технологии и покрытия](#). – 2020. – Т. 16, №1 (181). – С. 3–8.

## ФОРМИРОВАНИЕ МИКРОРЕЛЬЕФА СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ

Важной и ответственной задачей, стоящей перед машиностроением, является создание принципиально новых машин и оборудования для реализации инновационных технологий, позволяющих увеличивать производительность труда, повышать качество и обеспечивать конкурентоспособность выпускаемой продукции [1]. Срок службы деталей машин во многом зависит от показателей качества поверхностного слоя, которые окончательно формируются на финишных операциях, одной из которых является магнитно-абразивная обработка (МАО). Шероховатость поверхности после МАО находится, как правило, в пределах  $Ra$  0,02–0,16 (рис. 1). Установлено [2] влияние магнитных полей на механические свойства, структуру, фазовый состав изделий из закаленных сталей. Силы прижима ферроабразивного порошка (ФАП) к обрабатываемым поверхностям, обусловленные динамическими факторами, превышают в 2–3 раза силы магнитного происхождения. Микронеровности шероховатой магнитопроводящей поверхности концентрируют магнитный поток, образуя зоны с повышенной напряженностью магнитного поля, во впадинах между микронеровностями создаются зоны с пониженной напряженностью поля. Согласно [2], в начальный период обработки, когда микронеровности обрабатываемой поверхности и зерен ФАП находятся в исходном состоянии, производится только микрорезание отдельными микро и субмикровыступами, при этом срезаются наиболее выступающие микронеровности. Анализ показывает,

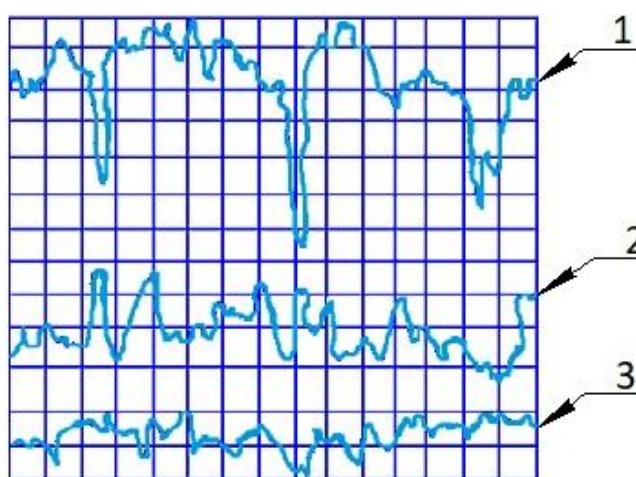


Рис. 1 – Профилограммы  
поверхностей после МАО:  
 $VU = 100 \cdot 10^3$ ,  $ГУ = 800$

1 –  $Ra$  0,16; 2 –  $Ra$  0,04; 3 –  $Ra$  0,02

что электромагнитное воздействие состоит в проявлении магнитно-пластического эффекта, возникновении индукционных токов и образовании окисных пленок, инициируемых воздействием электромагнитного поля. Установлено [2], что особенности стружкообразования при МАО объясняются повышенной пластичностью обрабатываемых сталей в присутствии переменного магнитного поля. По мнению авторов [2], интенсивность взаимодействия магнитного импульсного поля с веществом зависит от степени структурной и энергетической неоднородности материала и осуществляется нагрев этих участков, что обеспечивает изменение физических и механических свойств металла и уменьшает силу резания при съеме обрабатываемого материала. В результате взаимных перемещений обрабатываемой поверхности и полюсных наконечников имеет место образование индукционных токов, как на поверхности обрабатываемого изделия, так и на поверхности единичных зерен ФАП. Причиной появления индукционных токов служат периодические изменения плотности магнитного потока в рабочем пространстве, если индуктор создает знакопеременное или пульсирующее магнитное поле. При контакте зерен с обрабатываемой поверхностью суммарные микротоки производят разупрочнение микро- и субмикровыступов, прочность зерен ФАП при этом не нарушается, так как у них ферромагнитная матрица защищена тугоплавким слоем, поскольку удельное электрическое сопротивление  $\rho$  для зерна ферроабразивного порошка значительно больше этой величины для стали. Установлено, что для применяемых частот осцилляции линейные скорости зерен не превышают 0,03 м/с. При таких скоростях движения возникающая в каждом зерне ЭДС не превышает  $7 \cdot 10^{-6}$  В. В это же время в поверхностном слое заготовки,двигающейся со скоростью 2 м/с, на длине условного проводника возникает ЭДС =  $10^{-4}$  В. При движении заготовки относительно зерен порошка непрерывно образуются и вновь замыкаются элементарные электрические контуры, в параллельных ветвях которых действуют одинаково направленные ЭДС. Рассматривая ЭДС в качестве основной причины, вызывающей появление электрических токов, отметим, что определяемые ею токи могут протекать как по участкам поверхностного слоя заготовки, так и по параллельным электрическим цепочкам. Наличие разности электрических потенциалов между зернами порошка и обрабатываемой поверхностью объясняет более резкое, чем в других видах абразивной обработки увеличение производительности в присутствии химически активных СОТС, поскольку происходит протекание химических реакций на обрабатываемой поверх-

ности с образованием легко удаляемых окисных пленок. Согласно данным работы [2], окисная пленка толщиной 14 Å образуется на железе за 0,05 с, а на стали еще быстрее. Установлено [3], что для заготовок диаметром более 30 мм достаточно 0,03–0,07 с для образования химических пленок на стальных заготовках. Появляющиеся при МАО разности потенциалов между точками обрабатываемой поверхности ускоряют протекание химических реакций в присутствии СОТС как электролитов 2-го рода. Под действием внешнего магнитного поля эти границы изменяют свою форму таким образом, что в случае перпендикулярного магнитного поля они стремятся сформировать рельеф, состоящий из замкнутых областей малой площади, близких по форме к окружностям, а в случае действия параллельного магнитного поля – сохраняют лентообразную конфигурацию, направленную вдоль действия внешнего магнитного поля. Плотность окружностей замкнутых областей увеличивается в 4 раза при росте магнитной индукции от 0,01 Тл до 0,07 Тл. Текстура пленок представляет собой микрорельеф в виде острых пиков  $h = 4025$  нм и шириной 5202 нм. Увеличивается атомная доля  $O_2$  на поверхности микровыступа, что указывает на высокую долю продуктов окисления на данном участке. Микрорельеф образуется скоплением малорастворимых продуктов окисления  $Fe_2O_3$ ,  $Fe_3O_4$  и их комплексы, что определяет морфологию и химический состав микровыступов [4]. В результате анализа профилограмм поверхности, представленных на рисунке, установлено, что первая стадия изменения шероховатости поверхности при МАО с  $Ra$  0,63 до 0,16, характеризуется резким уменьшением высоты микронеровностей, который обусловлен резанием зернами ФАП как превалирующим фактором. Изменение шероховатости с  $Ra$  0,16 до 0,04 также осуществляется преимущественно абразивным резанием, так как одновременно со снижением высоты микронеровностей уменьшается их шаг, которому способствует снижение предела текучести материала, связанное с проявлением магнитоэластического эффекта и воздействием индукционных токов. На последней стадии снижение шероховатости с  $Ra$  0,04 до 0,02 происходит, в основном, путем сглаживания вершин микровыступов, сформированных в период абразивного резания и удаления окисных пленок. Установлено, что при МАО магнитное и электрическое поля дополнительно вносят свой вклад в формирование шероховатости и свойств поверхности. Выявлено, что уменьшение высоты микронеровностей и увеличение радиуса их скругления не сопровождается

заметным изменением шага и образуется новая, характерная для магнитно-абразивной обработки шероховатость.

Таким образом, приведенный методический подход по анализу профилограмм может служить основой научного обоснования стабильности получения при МАО шероховатости поверхности в диапазоне  $Ra$  0,02–0,16 и использован для определения минимально необходимого времени обработки для обеспечения заданных показателей шероховатости поверхности и качества поверхностного слоя.

### Литература

1. Витязь, П.А. «Индустрия 4.0»: от информационно-коммуникационных и аддитивных технологий к самовоспроизведению машин и организмов / П.А. Витязь, М.Л. Хейфец, С.А. Чижик // Вес. Нац. Акад. навук Беларусі. Сер. Фіз.-тэхн. навук. – 2017. – №2. – С. 54–72.

2. Ящерицын, П.И. Обработка изделий со сложным профилем в магнитном поле / П.И. Ящерицын, Т.Л. Деев, Л.М. Кожуро // Вестник машиностроения. – 1994. – № 3. – С. 42–44.

3. Коновалов, Е.Г. Основы электроферромагнитной обработки / Е.Г. Коновалов, Ф.Ю. Сакулевич. – М.н. : Наука и техника, 1974. – 272 с.

4. Набоко, А.С. Влияние малых магнитных полей на скорость электрохимической коррозии тонких пленок Fe : автореф. дис... канд. хим. наук / А.С. Набоко. – М. : ФГБОУ ВПО «ГУТХТ им. М.В. Ломоносова», 2013. – 15 с.

Бондаренко В.П., Матвійчук О.О., Євдокимова О.В.,  
Шестаков С.І. Інститут надтвердих матеріалів  
ім. В.М. Бакуля НАН України, Київ, Україна

## 3D-ТЕХНОЛОГІЯ ЗАГОТІВЕЛЬНОГО ТВЕРДОСПЛАВНОГО ВИРОБНИЦТВА

Сучасний стан твердосплавного виробництва обмежується уніфікованими і однотипними твердосплавними виробами, які випускаються серійно. В той же час це не дозволяє виготовляти дрібносерійні і, особливо, одиничні вироби складнопрофільної форми, великогабаритних розмірів, або двомірних тонких виробів з

великою площею або довжиною. Перш за все, це пов'язане з надто високою собівартістю виготовлення сталевого оснащення, тому що тільки розробка і виготовлення прес-форми робить вагомий внесок у собівартість продукції при дрібносерійному виробництві, загальна вартість виготовлення якої може сягати десятки тисяч гривень. По друге існують проблеми рівномірного розподілу суміші в об'ємі прес-форми, складнощами випресовування і подальшої маніпуляції з заготовками вагою до 10 кг, рівномірністю розподілу густини у довгомірних заготовках або плоских заготовках великої площі. Такими виробами є комплекти пар тертя великого розміру з вагою декілька кілограмів, деталі вирубних і витяжних штампів (Ш-подібні, ступінчасті), шаруваті деталі, в яких шари відрізняються розмірами, складом чи послідовністю розташування фаз, макро- та мікропористі фільтри, тонкостінні трубки, пластини великої площі.

Вирішити дані проблеми можна за рахунок використання 3D-принтерних технологій, які полягають у наступному:

1. Створення 3D-друком прототипів готових виробів з урахуванням коефіцієнтів усадки і допусків на механічну обробку.
2. На основі отриманих прототипів готових виробів виготовлення еластичних оболонок за формою виготовленого прототипу.
3. Заповнення отриманих оболонок прототипів виробів пластифікованими або термопластифікованими твердосплавними сумішами при критично малому тиску формування.
4. Створення робочих матеріалів у вигляді філаментів на основі термопластифікованих твердосплавних сумішей, що придатні для використання у 3D-принтерах з пошаровим друком (FDM/FFF метод).
5. Застосування стандартних технологій спікання у вакуумному або захисному середовищі з попередньою відгонкою термопластичного зв'язуючого.

На основі вище зазначеного перспективним є використання 3D-технологій заготівельного твердосплавного виробництва до якої ми відносимо:

- 3D-друк методом послідовного наплавлення шарів робочого матеріалу розплавом філамента;
- Еластостатичне пресування довгомірних виробів;
- Інжекційне формування.

Для реалізації на практиці 3D-технологій заготівельного твердосплавного виробництва нами було виконано комплекс послідовних досліджень:

- проведено математичне моделювання процесів одностороннього холодного еластостатичного пресування в закритих прес-формах пластифікованих твердосплавних сумішей у еластичних оболонках на основі поліуретанів різної еластичності та проведено експериментальну перевірку результатів розрахунків;
- проведено оптимізацію ступеня наповнення легкоплавкого шлікеру на основі воскоподібних речовин для інжекційного лиття в еластичні оболонки (отримані по надрукованим 3D-моделям) при температурі до 90 °C під тиском інжекції до 0,5 бар;
- проведено модельні комп'ютерні розрахунки по впливу природи та форми наповнювачів на механічні властивості філаментів;
- проведено розрахунки по впливу ступеня наповнення та розмірів наповнювача на в'язкості наповнених термопластів.
- визначено ефективність використання в якості розхідних матеріалів воскоподібних речовин з іншими органічними матеріалами для створення філаменту наповненого твердосплавною сумішшю придатного для 3D-друку методом пошарового наплавлення;
- отримано зразки філаментів наповненого твердосплавною сумішшю ВК8 та ВК20;
- проведено відгонку та спікання виробів отриманих еластостатичним пресуванням, 3D-друком та інжекційним литвом.

В результаті нами встановлено наступне:

Що при еластостатичному формуванні розподілений тиск пресування складає 25 МПа при якому досягається 50 % пористості в пресовці та знижується швидкість деформації. Розрахункові та експериментальні дані співпадають.

Розрахунком встановлено, що найбільшу міцність при стисканні (до 11 МПа) і при розтягу (до 4,5 МПа) мають філаменти на основі воскоподібних речовин в яких використовувались частинки неправильної форми або з шорсткою поверхнею, в той же час при використанні частинок з гладкою поверхнею міцність знижується до 10 разів.

Оптимальний ступінь наповнення термопластичного зв'язуючого твердосплавною сумішшю для виготовлення філаменту знаходиться в діапазоні від 40 до 50% (об.). Тому що при наповненні 60% (об.) в'язкість розплаву наповненого полімеру збільшується від 1500 Па·с до 59000 Па·С, що майже в 40 разів. При наповненні 40%

(об.) може відбуватися до 30% усадки при спіканні, при ще меншому наповненні не зберігається каркас виробу.

Оптимальний вміст твердосплавної суміші в шлікері виготовленого на основі воскоподібних речовин для інжекційного формування не повинен перевищувати 57 % (об.), що забезпечує низькі тиски для інжекції та високу текучість наповненого воскоподібного розплаву.

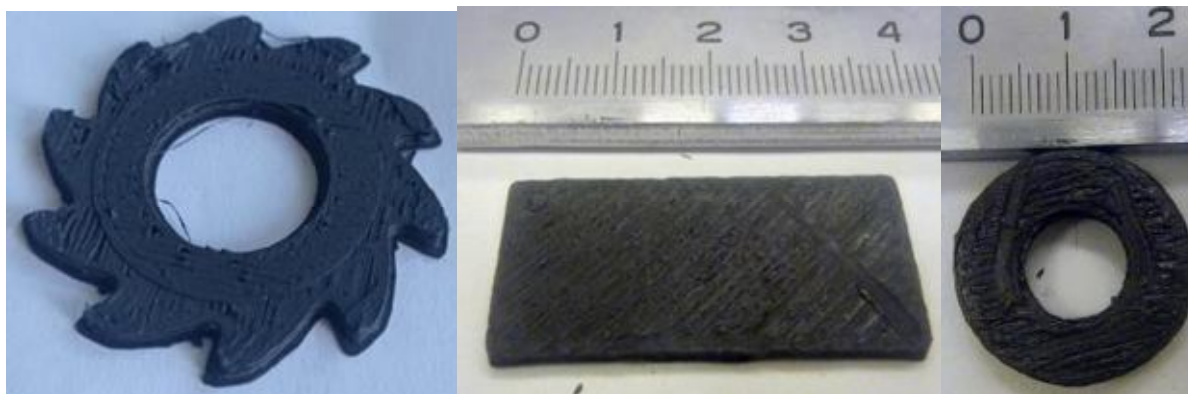
Інжекційне формування успішно здійснюється лише у підігріті еластичні форми, що мають канали для виходу повітря.

Оскільки виготовлення виробів 3D-друком може бути змасштабоване. Всі випробовування виготовлених філаментів нами проводилися на зразках малих розмірів на 3D-принтері Prusa i3 (рис. 1, 2).



**Рис. 1 – Зразок філаменту**

З надрукованих виробів зв'язуюче було видалено шляхом термодеструкції. Причому відгонку проводили в декілька етапів для видалення воскоподібної речовини при низькій температурі до 220 °С та зміцнюючо полімеру при високій до 450 °С. Подальше спікання проводили при температурах від 1400 до 1450 °С.



**Рис. 2 – Зразки виробів, що були надрукован з філаменту 50 % ВК8 + 50 % Зв'язуюче: фреза, пластина, кільце**

Всі три зазначені нами способи можуть з успіхом бути використані в заготівельному виробництві. При цьому вартість оснащення буде в декілька разів дешевшим і, як правило це вартість розхідних матеріалів.

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОБЛЕМИ УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ ПРИ РОЗВИТКУ СИСТЕМИ ОБСТЕЖЕННЯ ТА ТЕХНОЛОГІЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ВИРОБНИЦТВА ЗВАРНИХ КОНСТРУКЦІЙ З ЛЕГКИХ СПЛАВІВ**

Впровадження та сертифікація систем управління якістю відповідно до вимог національних або міжнародних стандартів у першу чергу дозволить підвищити конкурентоспроможність продукції вітчизняних виробників.

Типи даних, які підлягають аналізу й оцінці в рамках СМ (система менеджменту):

- відповідність продукції або послуги встановленим вимогам;
- задоволеність споживача;
- відповідність і результативність СМ;
- ступінь реалізації планів;
- показники результативності процесів;
- показники роботи зовнішніх постачальників;
- необхідність і можливість для поліпшення якості.

Підприємство виготовлення зварних конструкцій планує та впроваджує процеси моніторингу, вимірювання, аналізування, поліпшення щоб:

- продемонструвати відповідність виготовлення продукції та надання науково-технічної послуги, що надається вимогам до неї;
- забезпечити відповідність системи управління якістю;
- постійно поліпшувати результативність системи.

### ***Процесі моніторингу:***

А) Перевірку виконання планів виготовлення продукції та надання технічних робіт за державними замовленнями (проводяться керівництвом);

Б) Перевірку етапів виконання відділами технічних послуг за госпрозрахунковою тематикою. Аналіз керівництва проводиться для значних, державних або інших замовлень. Етапи виконання інших технічних робіт аналізуються керівником відділу;

В) Перевірку етапів підготовки підприємства до проходження, верифікацій, акредитацій;

Г) функціонування внутрішніх бізнес процесів (внутрішній аудит);

Д) ринкової стабільності підприємства (клієнтська база, кількість та обсяг замовлень);

Е) Вимірювання задоволеності замовника.

Відповідальність за забезпечення процесів моніторингу надання послуг покладено на керівництво.

Контроль та випробування в процесі надання послуги, крім власне контролю, передбачає перевірку параметрів, які можуть безпосередньо впливати на якість. Одним з превентивних заходів в цьому напрямку є внутрішня атестація процесів перед їх виконанням.

Безпосередньо забезпеченню якості послуги сприяє проведення контролю на визначених стадіях її виконання. Так звані точки контролю та порядок його проведення для кожної конкретної послуги визначаються внутрішніми документами та технічним завданням на виконання робіт.

Безпосередньо забезпеченню якості в процесі надання послуги сприяє проведення керівником робіт перевірки основних видів діяльності в рамках методики виконання.

Результати всіх випробувань та операцій контролю (акти, протоколи, записи в журналах тощо) оформлюються за встановленим порядком в інструкціях. Перші примірники актів та протоколів зберігаються у вповноваженого з якості, копії надаються керівникам зацікавлених підрозділів.

Результати вхідного контролю всієї закупленої продукції фіксуються в журналі обліку закупленої продукції та результатів її вхідного контролю.

Результати контролю послуги в процесі її виробництва фіксуються в Журналі реєстрації контролю послуг в процесі їх надання і засвідчуються особистим підписом заст. Директора, або керівником підрозділу.

Всі дані про контроль якості наданої послуги фіксуються в журналі ідентифікації (обліку) готової продукції.

Результати інспекційного контролю продукції відображаються в журналах реєстрації результатів контролю послуг.

Задоволеність споживача якістю продукції засвідчується його підписом в акті. Ступінь задоволеності споживача якістю наданої послуги визначається шляхом опитування та збирання відгуків.

### ***Висновки***

1. Результати контролю продукції з боку замовника з залученням ним сторонніх фахівців, якщо це передбачено договором, оформлюється визначеними замовником документами. Копії документів, які містять результати перевірки, надаються організації.

2. Результати внутрішніх перевірок використовуються для проведення аналізу діяльності підприємства в сфері якості і визначення напрямків її удосконалення, удосконалення структури та методів управління, підвищення якості продукції, виявлення прихованих внутрішніх резервів (компетентність персоналу) (рис. 1).



**Рис. 1 – Організаційна структура для розробки, впровадження і супроводження СМЯ**

3. На підставі результатів проведених перевірок керівник підрозділу, що піддавався перевірці, в п'ятиденний термін складає план коригувальних дій і подає його на розгляд уповноваженому з якості. Погоджений вповноваженим з якості план коригувальних дій затверджується директором. Контроль виконання запланованих коригувальних дій та попереджувальних заходів покладається на керівника відповідного підрозділу або на заступника директора (рис. 2).



Рис. 2 – Складові елементи концепції TQM

*Бурлаков В.І., Бурлакова Г.Ю.* Приазовський державний технічний університет, Маріуполь, Україна

## УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ ШЛЯХОМ ВПРОВАДЖЕННЯ РІЗАЛЬНИХ ПЛАСТИН З НАДТВЕРДОЇ КЕРАМІКИ

Якість обробленої поверхні і інтенсифікація виробництва завжди були першочерговим завданням для досліджень в металообробному виробництві. Отже, необхідно постійно вести роботу у напрямі вдосконалення цих чинників. Одним з шляхів вдосконалення є використання нових високоміцних матеріалів як інструментальних різальних пластин. Перспективним напрямом є використання як різальні пластини для оброблювального інструменту надтвердої нітридної кераміки. Цей матеріал досить міцний і зносостійкий, у зв'язку з цим питання про його обробку встає дуже гостро. Як відомо надтверда кераміки небагатьом поступається по міцності алмазу і його обробка досить проблематична. Таким чином, при обробці

надтвердої кераміки виникає деякі проблеми, з якими необхідно вважатися виробникам різальних пластин з надтвердої кераміки.

Незважаючи на деякі дослідження, що ведуться в цій області, України відстає від Європейських і Американських виробників по частині застосування високоміцних матеріалів при обробці матеріалів. Проблема мабуть, полягає у відсутності продуктивного способу обробки таких пластин, відсутність методів заточування різальних пластин, а, як відомо правильне заточування є гарантія підвищеної стійкості інструменту. Не розв'язана і проблема зняття напружено-деформованого стану пластин з надтвердої кераміки.

Існуючі способи обробки надтвердої кераміки не відповідають сучасним вимогам механічної обробки. А саме: продуктивність і якість практично завжди випереджають один одного і знаходяться на різних стадіях прогресу. Спосіб, який зрівняв би в собі обидва критерії, до недавнього часу не існував. З'явилася ідея, що полягає в тому, що використовуючи в основі магнітно-абразивну обробку накласти на неї вібраційну складову.

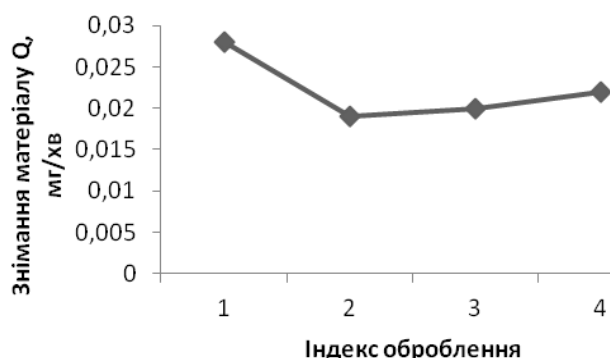
У чому сенс такого способу? Сенс полягає в тому, що магнітне поле формує інструмент з феромагнітного абразиву у вигляді гнучких "стовпчиків", причому, стовпчики абразиву розташовані досить близько один до одного. Заготівлі з надтвердої кераміки не магнітні і тому була використана вібрація, для надання осциляційного руху заготівок. Абразивна складова примушує надтверду кераміку рухатися в середовищі абразивного матеріалу, тим самим створюючи прецедент притирання деталей. Загальний вигляд установки для здійснення вібро-магнітно-абразивної обробки представлений на рис. 1.



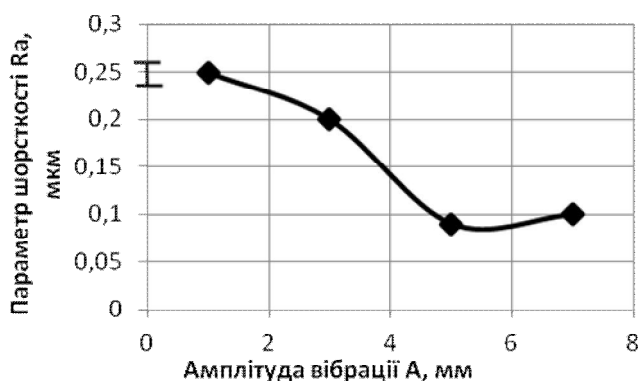
**Рис. 1 – Установка для моделювання ВіМАО**

Для вирішення питання збільшення продуктивності і якості обробки використовувався штучний алмаз АС6, але синтетичні алмази не в змозі утриматися у стовпчику абразиву, тому для утримання їх у абразивний мікс були введені гранули  $Al_2O_3$  на яких, за рахунок сил тертя можуть утриматися синтетичні алмази.

Продуктивність оброблення була перевірена в залежності від алмазної складової, магнітної сили, марки феромагнітного порошку. В усіх випадках продуктивність, яка рахувалася на основі величини знімання матеріалу, була вищою (рис. 2). Таким чином, за допомогою нового розробленого способу обробки було вирішено питання збільшення продуктивності та покращання якості оброблення (рис. 3).



**Рис. 2 – Залежність інтенсивності знімання матеріалу від виду оброблення**



**Рис. 3 – Залежність якості оброблення від амплітуди вібрації**

При проведенні експериментів була вирішена проблема заточування різальної кромки, яке відбувалося разом з обробкою заготовки та зняття напружено-деформованого стану.

Таким чином використання вібро-магнітно-абразивного оброблення у якості основного способу для обробки надтвердої кераміки, як показали проведені експерименти, доцільно.

## **ПРИМЕНЕНИЕ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕД ПРИ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКЕ ДЕТАЛЕЙ С ПОКРЫТИЯМИ**

В настоящее время технологический процесс формирования защитных износостойких покрытий представляет собой комбинированную обработку деталей, состоящую из подготовки поверхности подложки дробеструйной обработкой, плазменного напыления покрытий толщиной 0,7–0,8 мм и твердостью 45–55 HRC из различных порошковых сплавов (ПГСР-4, ХВС-3, ПН85Ю15) и механической финишной обработки. Покрытия из данных порошков широко применяются при упрочнении рабочих органов самого разнообразного по назначению технологического оборудования: почвообрабатывающих машин, экструдеров, строительной, дорожной, буровой, металлообрабатывающей и другой техники. В связи с этим вопрос обеспечения качества данных покрытий имеет существенное значение. В целом качество покрытий является сложной комплексной характеристикой, зависящей от множества факторов технологического процесса, и формируется последовательно на этапах предварительной обработки поверхности, нанесения покрытия и финишной обработки поверхности покрытия. В значительной степени качество деталей определяется стадией финишной обработки.

В этой связи представляют интерес методы финишной обработки (хонингование и полирование) деталей с покрытиями современными инструментами из сверхтвердых материалов, которые обеспечивают высокое качество поверхности в сочетании с высокой производительностью, надежностью и простотой выполнения технологического процесса.

Проблема обеспечения качества поверхностного слоя деталей с покрытиями при финишной обработке обычно рассматривается без рекомендаций по их обеспечению, что отрицательно сказывается на эксплуатационных свойствах деталей и машин в целом. Второстепенное внимание уделяется также роли конструкции инструмента в формировании шероховатости поверхностного слоя покрытия и его влияния на образование дефектов при обработке. Возрастающие требования к качеству поверхностного слоя напыленных деталей

могут быть удовлетворены при использовании в технологических процессах металлообработки смазочно-охлаждающих технологических сред (СОТС). Доля смазочных материалов, в том числе смазочно-охлаждающих жидкостей, являющихся основным видом СОТС, составляет лишь 1,2% от общего объема производимых нефтепродуктов, однако значение их чрезвычайно велико. Практика обработки металлов резанием показывает [1], что рациональное применение СОТС позволяет в 1,2–4,0 раза повысить стойкость инструмента, на 20–60 % форсировать режимы резания, на 10–50% повысить производительность труда, уменьшить энергозатраты при механообработке и улучшить состояние поверхности деталей.

Цель работы является применение СОТС при финишной обработке деталей с покрытиями и исследование ее влияния на качество поверхности, а также возможность их очистки от примесей, обеспечивая улучшение качества обработанных поверхностей.

В настоящее время разработано большое количество СОТС, применяемых при обработке деталей с покрытиями, эффективность использования которых зависит от их свойств. Основные типы СОТС различаются по следующим признакам: агрегатному состоянию (жидкие, твердые, пластичные, газообразные); физико-химическим особенностям базовой и дисперсных фаз (масляные и водные, эмульсии масла в воде, суспензии и др.); размерам частиц дисперсной фазы (ионная, молекулярная, коллоидная и грубая дисперсность; степени легирования присадками (невысокое, умеренное, высокое); типу применяемых присадок (водо- и маслорастворимые); классу применяемых присадок (животные и растительные жиры, органические кислоты, эфиры); степени вязкости [2].

Наиболее перспективными для процессов финишной обработки деталей с покрытиями считается применение полусинтетических, синтетических СОТС и эмульсий на водной основе. СОТС на водной основе обеспечивают снижение пожароопасности производства, обладают высокими смачивающими, охлаждающими, антикоррозионными, моющими свойствами, активно влияют на качественные показатели формируемой поверхности детали (шероховатость, износостойкость, задиростойкость).

Применяемые рабочие жидкости должны обладать высоким моющим действием на поверхность [3]. Моющее действие СОТС характеризуется степенью очистки обрабатываемой детали и инструмента от шлама, содержащего в себе мелкие частички металла и обрабатывающего инструмента (алмазное зерно, карбиды и неме-

таллические включения), которые удерживаются на поверхности детали электростатическими, ван-дер-ваальсовыми и механическими силами. Моющая, диспергирующая и адсорбционная способность СОТС определяется кинетикой, механизмами преобразования и деструкции их компонентов в условиях высоких температур и нагрузок, транспортировки продуктов деструкции, физико-химическими процессами взаимодействия плазмы, которая возникает в зоне обработки, с поверхностями, контактирующими в процессе обработки.

Моющее действие СОТС определяется в основном присутствием в них поверхностно-активных веществ (ПАВ): ионогенных, неионогенных, амфолитных. Высокой адсорбционной способностью обладают многие ПАВ, однако прочные адсорбционные пленки образуются только мицеллообразующие соединения. Применение этих СОТС не всегда позволяет решить задачу технологического обеспечения качества поверхностных слоев сопряженных деталей в изделиях. В работе были исследованы покрытия на основах Fe и Ni, сформированные плазменным напылением и обработанные хонинговальными эластичными брусками и кругами лепестковыми (КЛ) из алмазных лент с применением СОТС.

Хонингование применяется при окончательной обработке восстановленных цилиндров и гильз, отверстий в бобышках поршней, втулок верхней головки шатунов и др. Для окончательного хонингования отверстий в деталях, восстановленных методом плазменного напыления порошком ПН85Ю15, используют алмазные эластичные бруски на каучукосодержащих связках ВЗ-03, ВЗ-07. В зависимости от марки бруски отличаются лишь эластичностью алмазного слоя. Бруски крепятся к стальным колодкам хонинговальной головки эпоксидной смолой. Окончательно отверстия хонингуют эластичными брусками при следующих режимах: скорость вращения хона 0,7–1,5 м/с, скорость его возвратно-поступательных движений в пределах 0,17–0,34 м/с. Величина снимаемого слоя металла при хонинговании составляет от 0,01 до 0,2 мм, давление брусков на обрабатываемую поверхность 600 кПа. В качестве СОТС применяют керосин, смесь керосина с веретенным маслом при соотношении 2:1 или 3 %-ый фосфатсодержащий раствор на базе концентрата «Трибол». При хонинговании отверстий брусками из порошков алмаза АС2 зернистостью 63/50–80/63 достигается шероховатость поверхности  $Ra$  0,10–0,32, а  $Ra$  0,08–0,10 – алмаза АСМ зернистостью 14/10–40/28. Алмазные бруски не засаливаются и на

обрабатываемой поверхности не образуют царапин, при этом создается шероховатость с большой несущей поверхностью, что повышает долговечность машин и механизмов.

Важнейшим этапом технологического процесса модификации поверхности деталей является заключительная финишная обработка кругами лепестковыми КЛ 1А1 200x76x25 АС2 50/40 ВЗ-06-4, обеспечивающая качество поверхностного слоя в соответствии с требованиями чертежа [4].

При полировании покрытий алмазными эластичными кругами обычно применяют водные и масляные (углеводородные) технологические среды, так как связки инструмента, содержащие каучук, размягчаются при повышенных температурах. Водные среды дешевле, чем масляные. Большая удельная теплоемкость и лучшая теплопроводность воды позволяют быстрее отводить тепло. Масляные среды дольше сохраняют остроту режущих кромок алмазных зерен. В качестве СОТС применяют водные растворы, содержащие кальцинированную соду, эмульсолы и промышленное масло. Эмульсолы – водосмешиваемые СОТС с антикоррозионными и антифрикционными свойствами для металлообработки. По классификации ISO 6743 относится к классу МАВ. Используется водная 3–10 %-ная эмульсия молочно-белого цвета для обработки сплавов. Благодаря высокоэффективным рабочим характеристикам СОТС гарантирует высокое качество обрабатываемых деталей и стойкость инструментов при широком наборе операций.

Исследования показали, что применение различных технологических сред:  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (1%) +  $\text{NaN}$  (0,25%) +  $\text{H}_2\text{O}$  (98,75%); эмульсола ИГЛ 205 (5%-ный раствор в  $\text{H}_2\text{O}$ ); масла «Индустриального-20» при обработке КЛ напыленных покрытий способствует снижению шероховатости поверхности в 1,2–1,5 раза. Это объясняется тем, что хотя мощный воздушный поток, создаваемый кругом, препятствует попаданию СОТС в зону обработки, небольшая часть жидкости, за счет смазывающего, моющего и охлаждающего действия, все-таки принимает участие в процессе полирования. Водный раствор СОТС, имея большую теплоемкость и теплопроводность, обладает лучшим охлаждающим действием по сравнению с СОТС на основе масла. При алмазном полировании с охлаждением эмульсией или маслом шероховатость обработанной поверхности несколько выше. Поэтому для лепесткового полирования наиболее пригодны водные растворы СОТС.

Существенное влияние СОТС оказывает и на остаточные напряжения в поверхностном слое деталей. Объясняется это тем, что в результате действия воздушных потоков, создаваемых вращающимся КЛ, большая часть жидкости в процессе обработки никакого участия не принимает, основной эффект проявляется за счет снижения температуры полируемой детали.

Испытания ряда СОТС показали, что наибольшие сжимающие остаточные напряжения формируются при использовании 1 %-ного водного раствора кальцинированной соды и эмульсол ИГЛ 205. Менее эффективно применение в качестве СОТС масла «Индустриальное-20». Вероятно, это связано с тем, что водные растворы СОТС обладают лучшим охлаждающим действием благодаря большей теплоемкости и теплопроводности.

Результаты проведенных исследований позволяют заключить, что в процессе финишной обработки КЛ из алмазных лент с применением СОТС формируется поверхностный слой с благоприятными характеристиками  $Ra$  0,10–0,32 и  $\sigma = -160$ –200 МПа, обеспечивающие лучшие эксплуатационные свойства деталей машин.

Отработанные СОТС являются одним из главных загрязнителей окружающей среды в машиностроении. Их разлив, разбрызгивание, потери во время эксплуатации, нарушения технологического процесса приводят к загрязнению почвы, водоемов и воздуха. При эксплуатации СОТС концентрация вредных веществ в рабочей зоне не должна превышать значений, предусмотренных в санитарных нормах проектирования промышленных предприятий.

Ассортимент СОТС очень широк и постоянно обновляется. В виду огромного многообразия составов растворов, применяемых в технологическом оборудовании при механической обработке материалов, существуют различные способы их очистки и регенерации методами отстаивания, фильтрации, центрифугированием, химическим и биологическим. Вследствие этого, СОТС требует использования специального оборудования необходимого для их очистки.

Возможность технологического обеспечения качества поверхности не только путем регулирования геометрических параметров и физико-химических свойств материала покрытий открывает широкие перспективы применения хонингования и лепесткового полирования при модификации поверхностных слоев деталей машин, но и очисткой СОТС от механических примесей. Так же очистка спо-

способствует стабилизации свойств СОТС, продлению ее срока годности, и тем самым сокращению расходов на эксплуатацию.

Особую актуальность приобретает вопрос систематизации и усовершенствования методов промышленной очистки жидкостей по возможности с наименьшими трудозатратами и контролем уровня чистоты на протяжении всего цикла производства. Проблемы обеспечения промышленной чистоты жидкостей связаны с экономией материальных ресурсов, охраной окружающей среды, улучшением санитарных условий работы и снижением пожарной опасности технологических процессов.

В соответствии с техническими требованиями и свойствами СОТС, которые будут подвергаться очистке, разработана передвижная технологическая установка [5] для удаления из водных жидкостей мелкодисперсного шлифовального шлама, взвешенных инородных и посторонних включений (частиц размером от 3–5 мкм). Разработанная передвижная установка для рафинирования загрязненной рабочей жидкости упрощает технологический процесс очистки жидкости от производственной пыли в процессе металлообработки, продуктов коррозий трубопроводов и резервуаров, продуктов износа трущихся деталей, влаги и загрязнений биологического характера. Универсальная комплексная система выполняет очистку жидкостей концентрацией загрязнений от 12 г/л, понижает трудоемкость процесса очистки жидкостей и продлевает срок эксплуатации СОТС. Степень очистки от шлама достигает 85–90%, при этом качество поверхностного слоя при финишной обработке покрытий повышается на 20–35%.

В процессе финишной обработки плазменных покрытий хонингованием алмазными брусками и полированием КЛ очистка СОТС от механических примесей обеспечивает снижение шероховатости обработанных поверхностей ( $Ra$  0,10–0,32 и  $\sigma = -160$ –200 МПа) на 20–35% и повышение эксплуатационных свойств деталей машин.

## Литература

1. Смазочно-охлаждающие технологические средства для обработки металлов резанием : справ. / под ред. С.Г. Энтелиса, Э.М. Берлинера. – М.: Машиностроение, 1995. – 496 с.
2. Виноградов, Д.В. Применение смазочно-охлаждающих технологических сред при резании металлов : справ. / Д.В. Виноградов // Инженерный журнал. – № 1. – 2002. – С. 44–51.

3. Инструменты из сверхтвердых материалов / под ред. Н.В. Новикова и С.А. Клименко. – М. : Машиностроение, 2014.– 608 с.

4. Бурыкин, В.В. Смазочно-охлаждающие технологические средства для алмазно-абразивной обработки покрытий / В.В. Бурыкин // Новітні технології в машинобудуванні: металообробка, інструмент, реновація : зб. наук. праць. – Маріуполь: ПДТУ, 2010.– Вип. № 2. – С. 153–162.

5. Трофімов, І.Л. Пересувна установка для очистки робочих рідин, що використовуються в технологічних цілях / І.Л.Трофімов, В.В. Бурикін, О.М. Зубченко // Технологические системы. – 2007. – №3(39). – С. 80–85.

*Григор'єва Н.С., Гуменюк Л.О., Шабайкович В.А.*  
Луцький національний технічний університет,  
Луцьк, Україна

## **ПРОБЛЕМИ ВИРОБНИЦТВА ПІД ЧАС ПАНДЕМІЇ КОРОНАВІРУСА**

Несподівано виникла гостра проблема пандемії коронавірусу, котра вплинула на всі сфери техносфери, функціонування виробництва, соціальної сфери тощо [1]. Механізм зараження організму коронавірусом полягає в тому, що при інфікуванні білковий шип на поверхні вірусу SARS-CoV-2 прикріплюється до білка-рецептора на поверхні клітин людини і проникає в них. Вірус передається в основному повітряно-крапельним, повітряно-пиловим, контактним, а можливо ще іншими способами. Причинами зараження коронавірусом є мутації, в результаті яких з'являється новий тип вірусу. Причини мутації коронавірусу невідомі, які передбачаються його здатністю пристосовуватись до організму людини та її імунної системи. Розглядаючи ситуацію у світі, можна відмітити складну взаємопов'язану систему виробництва та його спеціалістів. Система включає працівників, продукцію, технологію, матеріально-технічну базу тощо.

Виробництво продукції при коронавірусі в першу чергу залежить від його повній підготовленості до функціонування, адаптації. Не кожену продукцію можна виготовляти в таких умовах і тому зосереджуються на її структурі, властивостях, взаємодії з навколишнім середовищем. Однозначно конструкція, технологія одержання

продукції має бути антикоронавірусною з точки зору відповідності матеріально-технічної бази, організації виробництва і особливо керівного та робочого персоналу. Всі виробничі приміщення повинні бути ізольованими, а повітря та обладнання провентильоване, продезинфіковане, додатково робітники постачені засобами індивідуального та колективного захисту.

Наприклад, фірма Boeing зменшила виробництво та скоротила на 10 % персонал у зв'язку з коронавірусом [2]. Компанія скоротила виробництво лайнерів 787 удвічі – до семи літаків на місяць – до 2022 року і відновить виробництво літаків 737 MAX у невеликому обсязі в поточному році, а до 2021 року збільшить його до 31 літаків на місяць. Європейський аерокосмічний концерн Airbus SE на початку квітня також прийняв рішення про скорочення виробництва. Компанія повідомила, що зменшить випуск літаків на третину у зв'язку з пандемією коронавіруса. Boeing планувала виробляти приблизно в два рази більше лайнерів 737 MAX. Пандемія коронавіруса завдала виробництву важкий удар, позначаючись на попиті з боку авіакомпаній, безперервності виробництва, а також стабільності ланцюжка поставок.

Великі автомобільні компанії також призупинили виробництво в Європі через пандемію. Також про припинення роботи на території Іспанії та Франції повідомили у прес-службі одного з найбільших авіабудівельних заводів світу. Зупинка виробництва Volkswagen триватиме. У Європі через оголошення пандемії у зв'язку з коронавірусом припинили виробництво такі великі автоконцерни як Volkswagen, Fiat, Renault і PSA Group. Всього 35 підприємств автомобільного виробництва повідомили про вимушене припинення роботи через пандемію. Крім цього, про плани призупинення виробництва в Іспанії та Франції повідомляють у прес-службі авіакомпанії Airbus та заміни іншою продукцією.

Так значним поступом була розробка маски, котра діагностує зараженням коронавірусом за допомогою спеціальних чуйників, які відслідковують основні параметри здоров'я людини [3]. Реєструється температура, насичення крові киснем, артеріальний тиск і частота серцевих скорочень, які є основними при первинному визначенні коронавіруса. Чуйники знаходяться в постійному зіткненні зі шкірою людини, усунувши контакт з хворим і забезпечивши віддалений контроль і передачу даних в реальному часі на смартфон.

Була також розроблена цікава антибактеріальна маска з графену. Фактично це інтегрована система моніторингу, в якій чутливі

чуйники, перебувають в постійному контакті зі шкірою людини, реєструють показники, що є основними при первинному визначенні коронавірусу COVID-19. Вказується, що маски впоралися з ліквідацією двох видів коронавірусів, причому, для створення масок вчені користуються власним, спрощеним методом отримання графену з використанням лазера. Експеримент показав, що 99,7% вірусу SARS-CoV-2 було знищено після 30 секундного впливу короткохвильового ультрафіолетового випромінювання з довжиною хвилі 222 нм і щільністю теплового потоку  $0,1 \text{ мВт/см}^2$ .

Американські вчені створили багаторазову маску з підігрівом, яка знищує віруси. В маску вбудована мідна сітка, котра постійно підігривається. При диханні повітря проходить через сітку, яка вбиває вірусні частинки високою температурою. Інноваційний гігієнічний пристрій допоможе медикам, які постійно контактують з хворими на коронавірус, а також стане в нагоді людям у випадках неможливості дотримування соціальної дистанції, наприклад, в транспорті в годину пік тощо. Концепція роботи даної маски відрізняється від інших тим, що не стримує проходження вірусу через маску, а уповільнює його рух і знищує.

Ряд підприємств замість закриття також змінили продукцію на потрібну для боротьби з коронавірусом. Так, автомобільні концерни почали випускати апарати ШВЛ, а лікєро-горілчані заводи, текстильні фабрики - антисептики і захисні маски. У зв'язку з пандемією коронавірусу багато світових компаній перенаправили частину свого виробництва на виготовлення життєво важливих засобів захисту, медичного обладнання та оснащення. Американські компанії Old Fourth Distillery та Moonrise Distillery, що спеціалізувалися на виробництві спиртних напоїв, почала виробляти антисептики для рук. Група Kering, один з лідерів світового ринку товарів класу люкс, оголосила, що готова запустити виробництво медичних масок на французьких заводах модних будинків Balenciaga і Yves Saint Laurent.

У Чехії розробили фільтри, що потенційно здатні знищувати COVID-19 для вентиляційних систем, які допоможуть знезаражувати середовище у приміщеннях. Цей пристрій допоможе у боротьбі з коронавірусом, а людям дозволить на решті зняти маски у приміщеннях. Над прототипом кілька місяців працювали інженери з одного із празьких університетів.

Зрозуміло, що до появи спеціальних ліків, препаратів, лікування чи вакцинація від коронавірусної хвороби буде малоефективною. На

жаль, дієвим способом профілактики і реагування на поширення коронавірусної хвороби залишаються тільки обмежувальні протиепідемічні заходи. Елементи економічних витрат на техносферу, заражену коронавірусом (рис. 1), є сама коронавірусна хвороба, соціальна сфера та виробництво продукції. При цьому головним виступає медичний персонал з його мізерними зарплатами, які безумовно вимагають значного підвищення, на що держава не може собі дозволити з-за поганого стану економіки і її подальшого занепаду. Тут можна також віднести їх низьку кваліфікацію (яка плата, така праця!). Практика минулого показала, що з-за об'єктивних і суб'єктивних причин часто відчувається дефіцит кадрів, тобто завжди повинен бути кадровий резерв, якого на жаль нема. Дуже багато медпрацівників з цих причин виїхали за кордон, де успішно працюють.

Необхідним є профілактика та обов'язкове всеохоплююче тестування на коронавірус, засоби захисту, алгоритм лікування тощо. Без необхідних сучасних ліків і супутніх матеріалів ніякого покращення не передбачається. Надзвичайно важливим виступають наукові дослідження процесів, що вимагають високої кваліфікації дослідників і організації наукових лабораторій, центрів тощо, які відкриваються в передових країнах з високим рівнем економіки. Але головним вважається якість урядування та управління, яка є явно недостатньою.

Замість хімічної обробки воду чи повітря опромінюють ультрафіолетовим світлом, яке є ефективним: віруси, бактерії та інші мікроорганізми знищуються ультрафіолетом за лічені секунди. Адаже таке випромінювання пошкоджує геном мікроорганізмів, через що збудники хвороб не можуть далі розмножуватися. Під час пандемії коронавіруса, який зокрема передається через аерозольні частинки вологи у повітрі, до дезінфекції за допомогою ультрафіолету прикута особлива увага. Використовують нові ультрафіолетові лампи, які створюють дезінфекційну варштуру під стелею, де циркулює та очищується повітря. До цього при використанні світла ультрафіолетових ламп у приміщеннях доводилося усіляко уникати його потрапляння на людину, оскільки воно є шкідливим для здоров'я.

Велике значення мають не тільки засоби індивідуального захисту: костюми безпеки, ізоляційні халати, маски, захисні окуляри, щитки, рукавички, респіратори тощо. Особливо корисною є ультрафіолетова лампа Care 222, яка вбиває коронавірус в приміщенні. Про це повідомляє Kyodo News. Її можна використовувати для дезінфекції приміщень, де постійно знаходяться люди, наприклад, в

автобусах, поїздах, ліфтах, літаках, офісах. Нова лампа випромінює ультрафіолетові промені з довжиною хвилі 222 нм замість звичайних 254. Це робить їх смертельними для коронавірусу, але нешкідливими для людини. Ефективність 222-нанометрових УФ-променів у знищенні COVID-2019 підтвердили також наукові дослідження.

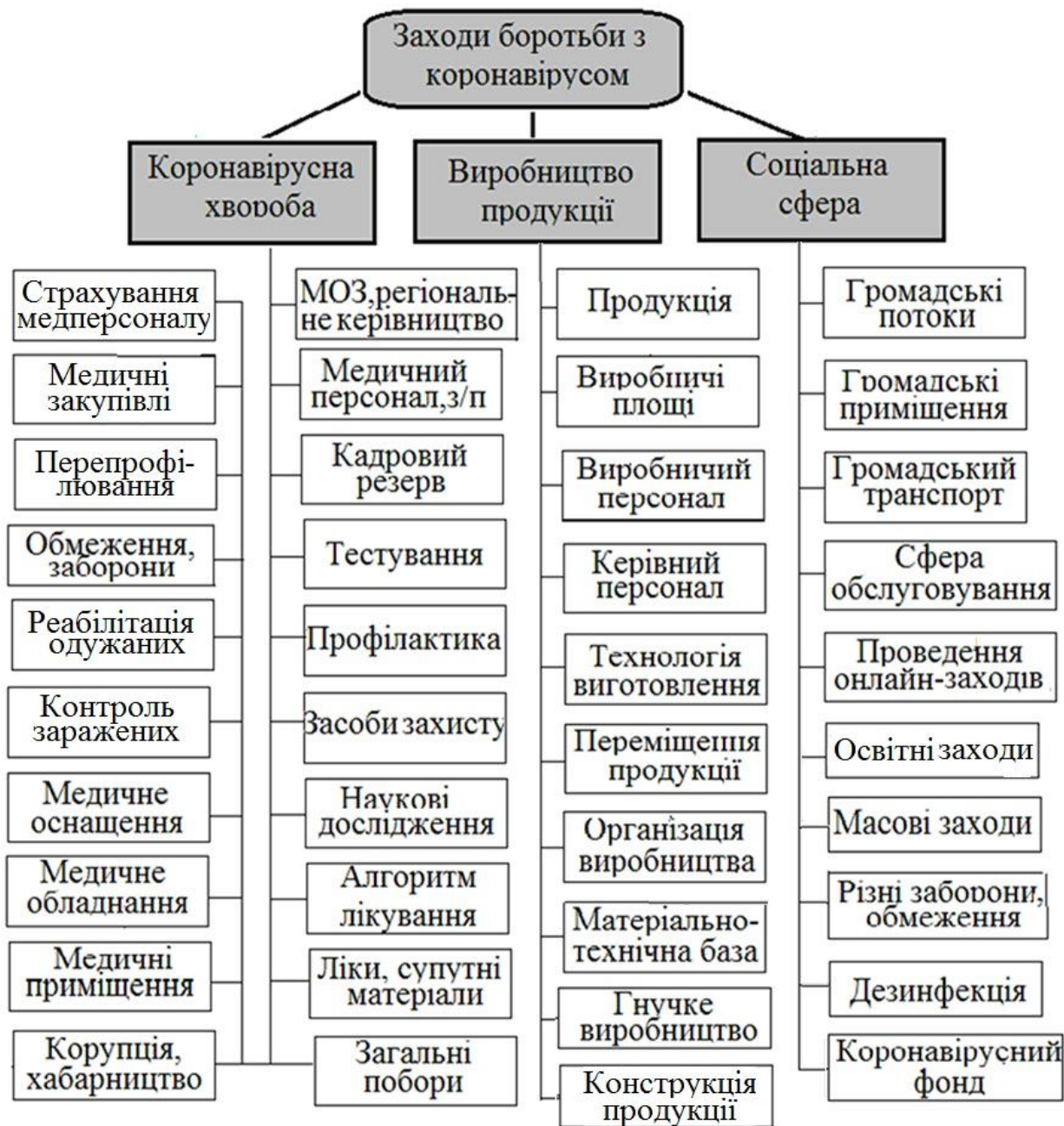


Рис. 1 – Заходи боротьби з пандемією коронавірусу

Під час пандемії коронавірусу виробництво обов'язково повинно працювати [4], адаптоване до неї. Для цього використовуються захисні засоби, зміна конструкції виробів, технології та організації, транспортування. Не діють локдауни, які не мають ні краплі логіки, ні грама здорового глузду.

## Література

1. Баранова, Анча. Коронавірус Інструкція з виживання / Анча Баранова. – Вид. «Наш формат», 2020. – 155 с.
2. Кулицький, С. Проблеми розвитку економіки України, обумовлені пандемією коронавірусу COVID-19 у світі і пошук шляхів їх розв'язання / С. Кулицький // Україна: події, факти, коментарі. – 2020. – № 8. – С. 53–63.
3. Інтернет. Приклади іноземного виробництва при коронавірусі.
4. Шабайкович, В.А. Сучасне виробництво продукції / В.А. Шабайкович. – Львів : Вид. ЛІМ, 2014. – 129 с.

*Ермишкин В.А., Минина Н.А., Соловьева Ю.Б.,  
Палий Н.А.* Институт металлургии и материаловедения  
им. А.А. Байкова РАН, Москва, Россия

## СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ПРИ МАКРОСКОПИЧЕСКОМ И МИКРОСКОПИЧЕСКОМ АНАЛИЗЕ РАЗРУШЕНИЯ

Критериям трещиностойкости отводится важная роль в оценке работоспособности высокопрочных авиационных материалов, поскольку они задают предельные условия равновесия материала на фронте трещины в момент перехода ее к росту. В настоящее время эти критерии устанавливаются в рамках механики разрушения. Применительно к оценке трещиностойкости микроскопических образцов в ней в качестве критерия используется коэффициент интенсивности напряжений (КИН). Оценки КИН привязаны к модам разрушения, которые характеризуют взаимную ориентацию оси приложения нагрузки, направления нормали к плоскости трещины-надреза и фронта последней. Настоящая работа выполнена на образцах для оценки КИН при разрушении по моде нормального отрыва т.е.  $K_{Ic}$ . Анализ разрушения в рамках механики имеет ряд недостатков: 1) материал в ней рассматривается как сплошная бесструктурная среда; 2) в ней не рассматривается процесс зарождения и роста трещины до макроскопических размеров; 3) реальная трещина заменена надрезом, в вершине которого формируется усталостная трещина; 4) реальное развитие процесса разрушения, как показали эксперименты, проведенные методом *in situ* в колонне высо-

ковольтного электронного микроскопа развиваются при участии всех трех мод разрушения: нормального отрыва, продольного и поперечного сдвигов. Несмотря на это важным достоинством линейной механики разрушения (ЛМР) является установление связи между КИН и характеристиками локального напряженного состояния материала на фронте трещины. Если для ранжирования существующих сплавов по трещиностойкости критериев механики достаточно, то для разработки сплавов с высоким сопротивлением разрушению и технологий, повышающих их трещиностойкость, методов механики совершенно недостаточно. Это же относится к оценке КИН по данным летных и стендовых испытаний самих летательных аппаратов. Физические представления о развитии процесса разрушения используются для изучения микромеханизмов зарождения и распространения трещин, изучения роли структурных факторов в развитии этих процессов и их кинетики. Однако в рамках этого подхода не установлены условия, при которых значения КИН, определенные по данным механических испытаний (макроскопический подход к анализу разрушения) и из анализа структурных проявлений разрушения (микроскопический подход) дают совпадающие результаты. На выяснение этих условий с помощью фотометрического анализа структурных изображений были направлены усилия авторов статьи. В ИМЕТ РАН в 2010 г. был разработан бесконтактный метод фотометрического анализа структурных изображений (ФАСИ), который позволяет оценить трещиностойкость материала с учетом его структурного состояния. ФАСИ принимает в расчет неоднородность исходного структурного состояния и его эволюцию при нагружения и оценить изменение энергии в результате деформирования, и по этим данным получить характеристики КИН. Экспериментальная часть работы была выполнена на образцах для внецентренного растяжения, изготовленных из листа толщиной 6 мм. на высокопрочном алюминиевом сплаве В95 (табл. 1).

**Таблица 1 – Химический состав сплава В95**

Fe	Si	Mn	Ni	Cr	Ti	Al	Cu	Mg	Zn	Примесей
до 0,5	до 0,5	0,2– 0,6	до 0,1	0,1– 0,25	до 0,05	86,3– 91,5	1,4– 2	1,8– 2,8	5–7	прочие, каждая 0,05; всего 0,1

Исходное состояние образцов было сформировано горячей прокаткой и двухступенчатой термообработкой по специальному режиму. Форма образца для оценки КИН показана на рис. 1.

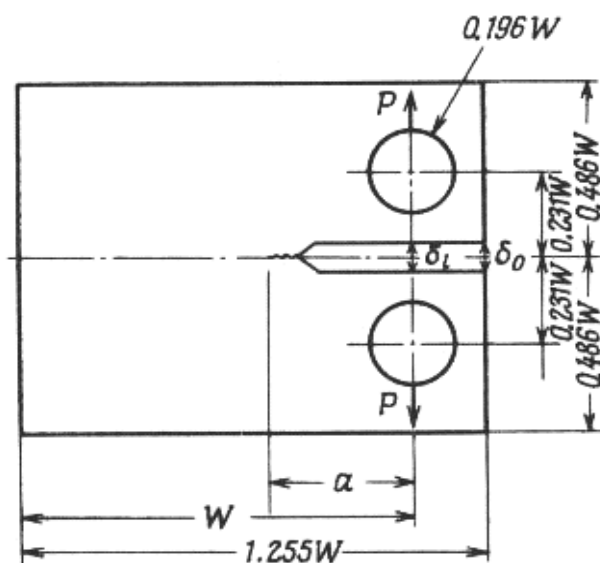


Рис. 1 – Форма образца для оценки КИН

Параметры образца равны  $W = 62$  мм,  $a = 34$  мм. Вершине трещины-надреза электроэрозионным способом наносили надрез шириной 0,4 и длиной 0,4 мм. В процессе испытания поверхность образца записывалась на видеокамеру. Комплексная обработка диаграммы нагружения и покадровый анализ видеозаписи методом ФАСИ позволили получить три оценки КИН. Первая была получена расчетом по формуле из справочника Мураками для этого типа образцов, вторая по стандартной методике в соответствии с ГОСТом, третья по данным ФАСИ. Соответствующие оценки КИН составили: 1 –  $49,12 \text{ МПаМ}^{0,5}$ , 2 –  $48,1 - 52,5 \text{ МПаМ}^{0,5}$ , 3 –  $51,32 \text{ МПаМ}^{0,5}$ . На основании полученных результатов можно сделать вывод о близости оценок КИН, полученных на одних и тех же образцах по принципиально отличающимся методам их оценки.

*Работа выполнялась по государственному заданию № 075-00947-20-00*

*Зяخور И.В., Гуцин К.В., Самотрясов С.М.,  
Завертанный М.С., Левчук А.Н.* Институт  
электросварки им. Е.О. Патона, Киев, Украина

## **ТЕХНОЛОГИЯ КОНТАКТНОЙ СТЫКОВОЙ СВАРКИ ОПЛАВЛЕНИЕМ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА 2219-T87**

Алюминиевый сплав 2219 благодаря высокой удельной прочности широко используются в конструкции изделий космической и авиационной техники, в частности, при изготовлении баков для криогенного ракетного топлива мобильных пусковых установок. Для достижения максимального уровня прочности сплав 2219 поставляется в термомеханически упрочненном состоянии T87, которое достигается термообработкой на твердый раствор, деформационным упрочнением со степенью деформации 7% и последующим искусственным старением.

При изготовлении изделий авиационной и космической техники из сплава 2219-T87 используют различные способы сварки (электронно-лучевую, дуговую, трением, контактную стыковую оплавлением), отличающихся термическим воздействием на металл шва, и обуславливающим разупрочнение сплава под воздействием термического цикла сварки. Высокотемпературная термическая обработка изделия позволяет в значительной степени восстановить структуру и механические свойства шва, однако при производстве крупногабаритных конструкций является трудноосуществимой задачей.

Поэтому актуальной проблемой является разработка технологии сварки изделий из сплава 2219-T87, обеспечивающей без последующей термической обработки соединений, уровень прочности, удовлетворяющий разработчиков изделий космической и авиационной техники.

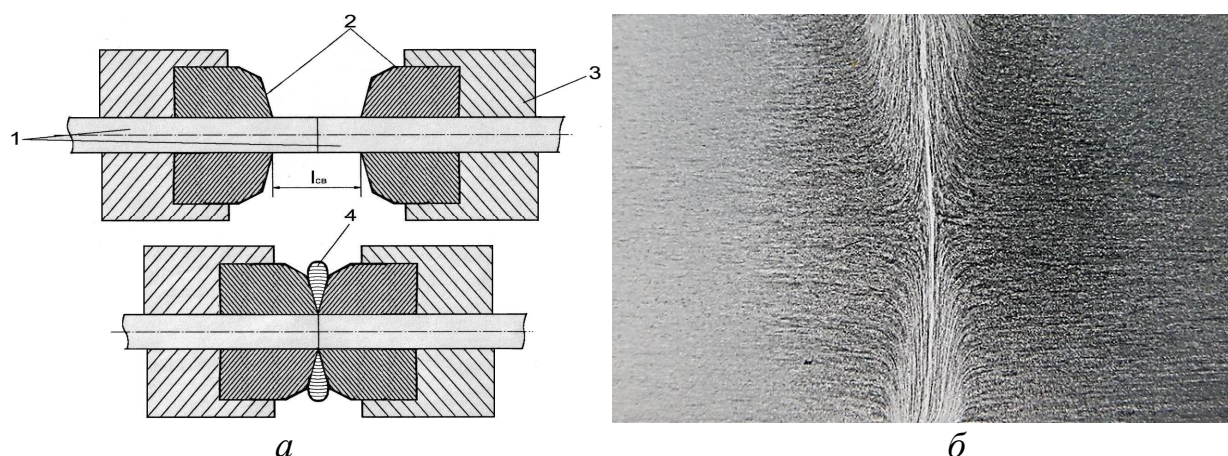
Перспективным процессом изготовления продольного (стрингер-фитинг) и поперечного (обечайки, шпангоуты) силового набора летательных аппаратов является контактная стыковая сварка оплавлением (КССО). Этот способ сварки давлением обеспечивает высокое стабильное качество соединений, объединяет в едином цикле сборочные и сварочные операции, не требует применения вспомогательных расходных материалов.

Цель работы состояла в изучении формирования соединений прессованных профилей сплава 2219-T87 при КССО и определении

уровня разупрочнения сплава при сварке без последующей термической обработки.

Исследования проводились на образцах сечением  $60 \times 15$  мм длиной 200 мм, вырезанных из пресованных профилей сплава 2219-T87 вдоль направления проката. Опытные сварки проводили на лабораторной сварочной машине К607, оборудованной сварочным трансформатором мощностью 75 кВА и приводом осадки, обеспечивающим создание осевого усилия до 1000 кН.

Процесс сварки КССО образцов сплава 2219-T87 включал в себя несколько стадий: предварительный подогрев сопротивлением, оплавление, осадку. Обязательным условием получения качественных соединений из алюминиевых сплавов при КССО является принудительное формирование стыка (рис. 1, а).



**Рис. 1 – Схема (а) КССО и макроструктура соединения (б).**

1 – детали; 2 – формирующие устройства; 3 – токоподвод; 4 – грат,  
 $l_{св}$  – припуск на сварку

Исследованиями макроструктуры соединений установлено изменение направления волокон проката в зоне термомеханического влияния до  $90^\circ$  по сравнению с их направлением в основном металле (ОМ) сплава (рис. 1, б).

В результате экструзии металла в зазор между формирующими устройствами происходит частичное растворение выделений вторичных фаз – их размер уменьшается, скопления в виде «цепочек» частично разрушаются, частицы становятся обособленными. Такая структура свидетельствует о существенном влиянии интенсивной пластической деформации при осадке с принудительным формированием на морфологию выделений вторичных фаз.

В процессе отработки режимов КССО по методике «экспресс-анализа» корректировали значения припусков на оплавление и

осадку до тех пор, пока в изломах соединений отсутствовали недопустимые дефекты. Оптимальные температурные условия деформации при осадке определяли из условий горячего прессования сплава. Установлено, что предварительный нагрев сопротивлением образцов до  $T_{\text{под}} = 200$  °С с последующим оплавлением на протяжении 15 с и осадкой при значении давления не ниже 500 МПа обеспечивают формирование качественных (бездефектных) соединений.

На основании результатов исследований разработана технология КССО сплава 2219-T87, обеспечивающая получение соединений с пределом прочности 76% от уровня ОМ без последующей термической обработки.

**Таблица 1. Механические свойства основного металла (ОМ) и сварных соединений (СС) сплава 2219-T87**

Образец	$\sigma_{\text{в}}$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta_5$ , %	Угол загиба $\alpha^\circ$	КСУ, Дж/см <sup>2</sup> ( $T = 20^\circ\text{C}$ )	Коэффициент прочности $\sigma_{\text{в СС}}/\sigma_{\text{в ОМ}}$
ОМ	486	413	10,9	37	13,9	-
СС	372	263	4,3	33	16,6	0,76

*Льницька Г.Д., Лавріненко В.І., Смоквіна В.В.,  
Зайцева І.М., Загора А.П.* Інститут надтвердих матеріалів  
ім. В.М. Бакуля НАН України, Київ, Україна

## **ПІДВИЩЕННЯ ОДНОРІДНОСТІ ЗА МІЦНІСТЮ ШЛІФПОРОШКІВ АЛМАЗУ, СИНТЕЗОВАНИХ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ФЕРОСПЛАВІВ**

Експлуатаційні характеристики алмазного інструменту значною мірою визначаються властивостями алмазів. В свою чергу, властивості алмазних порошків обумовлюються технологіями синтезу, обробки, класифікації за розмірами і формою, сортуванням за фізико-хімічними властивостями, що забезпечують отримання порошків з заданими властивостями. Згідно з вимог, що пред'являються до сучасного алмазного інструменту, основними характеристиками якості шліфпорошків алмазу є крупність у вигляді зернистості і зернового складу, а також характеристики міцності: міцність

і термостабільність. Однак для поліпшення роботи алмазного інструменту велике значення має отримання шліфпорошків алмазу однорідних за цими характеристиками.

Однорідність є важливою ознакою якості алмазних порошків. Для оцінки величини однорідності розроблено методи, що дозволяють оцінювати однорідність шліфпорошків за основними технологічними характеристиками якості і, насамперед, за характеристиками міцності і геометричними (у вигляді лінійних розмірів зерен алмазу) характеристиками зерен шліфпорошків алмазу [1]. Тому для отримання алмазних порошків різних марок необхідно застосування процесів класифікації за розміром зерен і різних способів сортування за певними властивостями. Нині найбільше застосування знайшов спосіб сортування алмазних порошків за формою на вібростолі, крім того, широко використовується розділення алмазних порошків в магнітному полі за вмістом в них внутрішньокристалічних включень.

В Інституті надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України розроблені і промислово освоєні адгезійно-магнітний та адгезійно-електричний способи сортування, що засновані на відмінності кристалів алмазу за рівнем дефектності їх поверхні [2]. Відомо, що на характеристики міцності алмазних шліфпорошків істотно впливають включення металу-розчинника, інших об'ємних і поверхневих дефектів форми зерен. Дефектність поверхні тісно пов'язана з міцністю кристалів. В той же час поверхня кристала алмазу містить багато активних зв'язків, які при певних умовах, міцно утримують тверді мікрочастинки. При цьому мікрочастинки, що наносяться, мають сильні магнітні або електричні властивості, що призводять до посилення магнітних або електричних властивостей шліфпорошків алмазу, яка пропорційна ступеню дефектності їх поверхні і дозволяє розділяти їх у відповідних полях на кілька фракцій, що відрізняються між собою за дефектністю поверхні і за міцністю.

Порошки синтетичного алмазу з високою однорідністю за міцністю, лінійними розмірами і високою термостабільністю, відносяться до розряду елітних порошків. Для отримання елітних шліфпорошків алмазу розроблена технологія отримання шліфпорошків синтетичного алмазу елітних марок АС400-Е – АС50-Е, синтезованих в різних ростових системах.

Для отримання високоміцних термостійких шліфпорошків синтетичного алмазу, з високою однорідністю за міцністю та лінійними розмірами вихідні порошки спочатку проходили магнітну сепар-

рацію при різній напруженості магнітного поля з метою відділення порошків з високою магнітною сприйнятливістю, що відповідає більш високому вмісту внутрішньокристалічних металічних включень сплаву-розчинника вуглецю в зернах алмазу. При розділенні за дефектністю поверхні зерен шліфпорошків для підвищення контрастності властивостей шліфпорошків алмазу, що розділяються, синтезованих із застосуванням феросплавів для розчинення вуглецю, застосовували електропровідні тонкодисперсні порошки. Формування за допомогою селективного адгезійного закріплення електропровідних частинок на дефектних ділянках поверхні посилені електричних властивостей порошків дозволяє розділити порошок в електричному полі на ряд фракцій, що відрізняються між собою за дефектністю поверхні і за характеристиками міцності. Потім після розділення фракції порошків алмазу піддаються термічній обробці в інертному середовищі для зняття внутрішніх напружень в кристалах алмазу при температурі 800 °С.

Для збільшення вмісту основної фракції і підвищення коефіцієнта однорідності за розмірами зерен алмазу використовується остаточна класифікація за зернистостями на ситах ряду R-20 з метою виділення вузьких класів зернистостей або додаткова класифікація за формою зерен на вібраційному столі.

Для отримання високоміцних шліфпорошків алмазу з високою однорідністю за міцністю використовували алмази зернистості 500/400 марки AC200, синтезованих в ростовій системі Fe-Co-C (табл. 1).

**Таблиця 1 – Результати розділення за дефектністю поверхні алмазів AC200 500/400**

Продукти розділення	Вихід, %	$K_a$ , %	$\chi, \times 10^{-8}$ м <sup>3</sup> /кг	$P, H$		$K_{TC}$ , %	H/3, %	Марка	
				вих.	після термічної обробки				
					800°С				1100°С
1	11,2	0,03	7,5	469,0	499,0	426,8	91	0,08	AC250-E
2	71,3	0,10	20,5	415,7	437,7	370,0	89	0,10	AC200-E
3	10,1	0,16	30,7	327,8	329,9	285,2	87	0,11	AC160-E
4	7,4	0,29	41,3	250,4	228,7	200,3	80	0,18	AC125
Вихідний	100,0	–	25,0	409,8	423,5	319,7	83	0,15	AC200

В отриманих порошках вихідних і після розділення визначали вихід отриманих окремих продуктів, їх фізико-механічні характеристики: міцність у вигляді руйнуючого навантаження при статичному стисненні при кімнатній температурі ( $P$ , Н) і після термічної обробки при 800 і 1100 °С ( $P_{т.о.}$ ) за методиками ДСТУ 3292, розраховували термостійкість ( $K_{ТС}$ ), коефіцієнт однорідності за міцністю ( $K_{одн. міц.}$ ), коефіцієнт однорідності за лінійними розмірами ( $K_{одн. л.р.}$ ), вимірювали питому магнітну сприйнятливість ( $\chi$ ) і оцінювали дефектність поверхні зерен алмазу за коефіцієнтом поверхневої активності ( $K_a$ ), вміст домішок в зернах алмазу у вигляді неспалимого залишку (н/з), які визначали за методиками ІНМ ім. В.М. Бакуля НАН України.

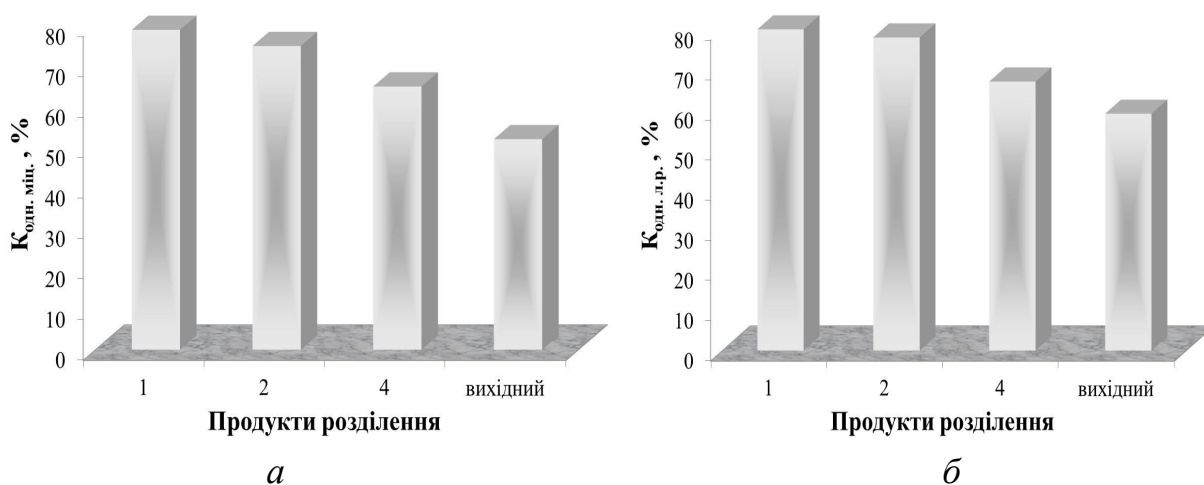
Як видно з таблиці при розділенні алмазних шліфпорошків за дефектністю їх поверхні алмазів зернистості 500/400 марки АС200 отримано 4 продукти, що відрізняються між собою за величиною  $K_a$ , що дозволило виділити з вихідної маси порошки алмазів з різними характеристиками міцності.

Встановлено, що при збільшенні дефектності поверхні зерен алмазу знижуються їх характеристики міцності. Так, при збільшенні  $K_a$  від 0,03 до 0,29% показник міцності при статичному стисненні зерен алмазу знижується в 1,9 рази. При цьому знижується їх термостабільність ( $K_{ТС}$ ) і збільшується вміст домішок в шліфпорошку. Виявлено, що після проведення термічної обробки алмазів виділених в 1-й і 2-й продукти при температурі 800 °С, за рахунок зняття внутрішніх напружень відбувається підвищення їх міцності для алмазів 1-го продукту на 6,4%, для 2-го продукту на 2,7%. При термообробці при температурі 1100 °С починається процес графітизації зерен алмазу, що призводить до зменшення показника міцності при статичному стисненні, при чому зі збільшенням вмісту домішок в зернах алмазу міцність знижується значніше. Так, для алмазів 1-го продукту на 10%, для 4-го – на 25%.

Крім іншого, після розділення за дефектністю поверхні зерен алмазу за коефіцієнтом однорідності за міцністю шліфпорошки алмазу відрізняються у порівнянні із вихідними порошками приблизно 1,50–1,25 рази, за коефіцієнтом однорідності за лінійними розмірами – 1,35–1,14 рази (рис. 1).

Таким чином, в результаті проведення розділення високоміцних шліфпорошків алмазу зернистості 500/400 марки АС200, синтезованих в системі Fe-Co-C були отримані високоміцні термостабільні шліфпорошки алмазу з високою однорідністю за міцністю і лі-

нійними розмірами зерен алмазу, які відповідають технічним умовам ТУ У 23.9-05417377-367:2020 «Шліфпорошки з синтетичних алмазів елітні для оснащення алмазного інструменту».



**Рис. 1 – Однорідність шліфпорошків алмазу зернистості 500/400 марки АС200 за міцністю (а) і за лінійними розмірами (б)**

## Література

1. Новиков, Н.В. Оценка качества порошков сверхтвердых материалов. – Ч. 1. Теоретические основы метода оценки характеристик качества / Н.В. Новиков, Г.Ф. Невструев, Г.Д. Ильницкая // Сверхтв. мат. – 2006. – № 5. – С. 74–83.

2. Новиков, Н.В. Оценка качества порошков сверхтвердых материалов. – Ч. 2. Практическое применение нового метода оценки характеристик качества / Н.В. Новиков, Г.Ф. Невструев, Г.Д. Ильницкая // Сверхтв. мат. – 2006. – № 6. – С. 58–67.

3. Ильницкая, Г.Д. Получение высококачественных алмазных шлифпорошков / Г.Д. Ильницкая, Г.П. Богатырева, Г.Ф. Невструев // Синтез, спекание и свойства сверхтвердых материалов : сб. науч. тр. – К. : ИСМ НАН Украины, 2005. – С. 63–71.

## **ДЕЯКІ ПЕРСПЕКТИВНІ НАПРЯМКИ ВДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ ОБРОБКИ РІЗАННЯМ**

Незважаючи на широке впровадження маловідходних методів виготовлення заготовок, у найближчі роки обробка різанням буде основним технологічним процесом у машинобудуванні і металообробці. Стан і рівень розвитку технології обробки різанням сучасних матеріалів є одним із визначальних факторів технічного прогресу, а, відповідно, і економічного розвитку будь-якої країни. При цьому, для відповідності сучасному виробництву технології механічної обробки потребують постійного вдосконалення.

Для цього, насамперед, потрібно розвивати уявлення щодо закономірностей процесу різання.

В ідеалі потрібне створення загальної теорії різання, яка охоплює питання обробки крихких, пластичних, структурованих і гетерогенних матеріалів незалежно від масштабу розгляду побудови, структури, властивостей матеріалів виробу та інструменту, явищ в зоні різання. У цьому зв'язку, перспективним є створення фрактальної теорії різання, заснованої на уявленнях про структури оброблюваного та інструментального матеріалів, показники процесу різання і параметри стану поверхневого шару виробів, що формується у процесі обробки, як про статистичні мультифрактали. Параметри фрактальної параметризації структури і властивостей оброблюваних матеріалів пов'язані як з вихідними показниками процесу обробки – продуктивністю процесу і працездатністю інструменту, так і з характеристиками стану поверхневого шару виробів після обробки та можуть бути використані як показник оброблюваності матеріалів різанням.

Перспективним також уявляється розвиток комп'ютерного моделювання процесу різання з використанням можливостей віртуальної (VR) і доповненої (AR) реальностей. Отримання результату на підставі віртуально збільшеної реальності (VAR) надає можливість уявляти, як процес різання послідовно реалізується на послідовних стадіях розвитку. При цьому можна віртуально втручатися в процес на кожній стадії, щоб зробити його більш ефективним. Контроль алгоритму адаптується до умов різання, які можуть реально змінюватися

через зміну кінематики та зношування інструменту, випадкові явища у динаміці процесу тощо.

Не менш важливим є створення комп'ютеризованої системи вибору робочого матеріалу інструменту для обробки різанням з урахуванням структурного стану матеріалу виробу.

Уявляється два шляхи реалізації таких систем: – перший передбачає створення баз даних, які включають результати практичних робіт з оцінки працездатності різальних інструментів при обробці різних конструкційних матеріалів з врахуванням кінематики процесу різання, режимів різання, властивостей оточуючого середовища, інструментального і оброблюваного матеріалів, інших умов процесу різання; – другий базується на аналізі умов навантаження в зоні різання, співвідношеннях показників структурного стану, об'ємних і поверхневих механічних, а також хімічних властивостей інструментального та оброблюваного матеріалів.

Актуальне завдання розширення гами композитів і покриттів для оснащення інструментів, які здатні адаптуватися до умов навантаження в зоні різання і мають функціонально-орієнтовані властивості, що відповідають експлуатаційному навантаженню на інструмент. Останнім часом активно розвиваються роботи по створенню інструментів, в яких використовують матеріали зі спеціальними властивостями, що обумовлюють можливість адаптації їх показників к термобаричному навантаженню в зоні різання, що забезпечує зниження температури та формування особливого триботехнічного стану на контактних ділянках. Наприклад, для мінімізації зношування різальних інструментів за рахунок зниження інтенсивності адгезійної взаємодії з оброблюваним матеріалом і окислювальних процесів запропоновані самоадаптивні покриття. Вони не протидіють окисленню, а здатні використати це явище для керування параметрами контактної взаємодії при різанні та зниження інтенсивності тертя і, відповідно, термобаричного навантаження у зоні контакту. Подібні покриття в процесі різання окислюються, створюючи поліоксидну вторинну структуру (трибоплівку), яка виконує роль твердого змащення.

Особливий інтерес з погляду поліпшення ефективності обробки в машинобудуванні викликає клас надтвердих матеріалів – композити на основі алмазу та кубічного нітриду бору (КНБ). Розширення номенклатури виробництва інструментів з надтвердих матеріалів, у тому числі багатолезових з композитів на основі кубічного нітриду бору груп ВН, ВL, ВС, різців з великих монокристалів алмазу, правлячих інструментів з робочими елементами з CVD-

алмазу дозволить суттєво поширити область ефективної обробки виробів з сучасних важкооброблюваних матеріалів. Вони відкривають можливості для використання в машинах найсучасніших конструкційних матеріалів з поліпшеними механічними властивостями, потребують створення принципово нових верстатів зі значно вищою продуктивністю і точністю

Найважливішим резервом підвищення ефективності механічної обробки є конструкція інструменту.

Насамперед, вона має враховувати особливості контактної взаємодії в зоні різання, мінімізуючи негативні явища, що дозволяє суттєво підвищити стійкість інструменту і продуктивність обробки при забезпеченні необхідного стану поверхневого шару виробів.

Створення «інтелектуальних» інструментів, здатних до самодіагностики поточного стану з використанням предиктивної аналітики відповідає реалізації положень концепції «Індустрія-4.0». У таких системах параметри обробки уточнюються в реальному часі, враховуючи результати виконання попереднього технологічного етапу. Алгоритм системи, керуючою обробкою, оперативно адаптується до існуючих умов, гнучко змінюються її режими. У комп'ютерній термінології це визначається як підміна частини жорсткої пам'яті в потоковому режимі гнучкою її частиною.

Для технічного використання такого потенціалу необхідно додати до їх схем можливості самокалібрування інструментів, малоінерційної зміни швидкості різання, подачі, повного контролю оперативного стану системи "верстат-інструмент-деталь" у будь-який момент робочого циклу.

Перспективним є розроблення 2D чи 3D адитивних технологій формоутворення інструментів. З використанням цих підходів можливо виготовлювати як складнопрофільні корпуси так й робочі елементи інструментів, що дозволяє підвищити ефективність або спростити кінематику верстатів.

Практичне використання наведеного вище, наряду з вже традиційними напрямками вдосконалення процесу обробки різанням – підвищенням швидкості різання, створенням захисних покриттів, мінімізацією використання МОТС та ін., є сучасним підґрунтям забезпечення ефективності промислового виробництва.

## **ПІДВИЩЕННЯ ТРИБОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЧАВУНУ КОМПЛЕКСНОЮ ОБРОБКОЮ**

Умови роботи вузлів тертя визначають ряд вимог до їхнього матеріалу: висока міцність при достатньому запасі пластичності, підвищена теплопровідність, досить високий модуль пружності, підвищена зносостійкість і гарна припрацьованість .

У вітчизняному машинобудуванні для деталей подібних вузлів широко застосовують як сірий легований чавун із пластинчастим графітом, так і високоміцний чавун із графітом кулястої форми, що відповідають перерахованим вимогам.

Аналіз відомих методів зміцнення робочої поверхні (азотування, сульфідкування, сульфоцианування та ін.) показує, що вони трудомісткі, тривалі, вимагають застосування дефіцитних і шкідливих хімікатів та складного устаткування. При такій обробці на поверхні чавуну утворюються одношарові покриття, які можуть із успіхом вирішувати лише одне конкретне завдання. Так, наприклад, поверхневі шари, отримані при азотуванні, підвищують зносостійкість, але погано припрацьовуються через високу твердість, що приводить до викрашування азотованого шару в процесі експлуатації. При фосфатуванні поліпшується припрацьовуваність, але не забезпечується необхідної зносостійкості чавуну.

Сульфідкування гарантує чавуну антифрикційні властивості за рахунок утворення м'яких складових типу сульфідів. Але ці шари не можуть тривалий час протистояти високим навантаженням, при яких працюють багато деталей.

У цьому зв'язку для забезпечення надійної безвідмовної роботи чавунних деталей, що працюють в умовах тертя та зношування, необхідно на поверхні одержати такий шар, який одночасно забезпечував би гарну та швидку припрацьовуваність, низький коефіцієнт тертя і мале зношування, мав здатність добре втримувати масляну плівку та протистояти задирам і схоплюванню.

Поверхневий шар з необхідними властивостями може бути отриманий, якщо його формування буде відбуватися в середовищі перегрітої пари водяного розчину водорозчинних солей, зокрема амонію молібденово-кислого.

При підвищеній температурі в контакті з металевою поверхнею відбувається дисоціація розчину та хімічних сполук з утворенням атомарних кисню, сірки, азоту, молібдену.

Елементи адсорбуються поверхнею, збільшують зносостійкість і поліпшують припрацьовуваність. Так як основне робоче середовище — перегріта водяна пара, то і температурний режим цього процесу може бути тим же, що і для парооксидування чавуну: нагрівання до  $600\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 20$ , час витримки не повинне бути більш 1 год. (за цей час встигає утворитися багат шарове покриття, що містить оксиди, нітриди та сульфід).

Слід зазначити, що в результаті взаємодії різних факторів графіт у поверхневому шарі змінює свою форму, стаючи кулястим, хоча в матриці він мав пластинчасту форму. При спостереженні в розтворюючому мікроскопі видно, що пластинчасті включення графіту округляються

*Кривошеков В.Е. Учебно-исследовательский центр  
«Надежность в судоходстве», Одесса, Украина*

## **СОВРЕМЕННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ОБСЛУЖИВАНИЯ (MAINTENANCE) МАШИН И СИСТЕМ**

Отдельные машины (большие и малые), их комплексы, технические конструкции, системы и их элементы уже давно стали неотъемлемой частью текущей жизни, как каждого отдельного человека, так и общности людей. Нельзя однозначно сказать, что результаты, так называемого, научно-технического прогресса (НТП) лишь облегчают и упрощают жизнь человечества. Нет, они создают и дополнительные проблемы для него. Они (машины и системы) требуют к себе внимания и разумного отношения. Они требуют от людей ухода за ними, говоря тем же языком НТП, – их поддержания и обслуживания – maintenance, причём обязательно предупредительного – predictive maintenance. Ранее мы уже говорили об искусстве качественного технического обслуживания машин/систем и указывали на близость понятий «надёжность» и «качество»[1–3]. Теоретически основой обслуживания любой техники, машин, конструкций, систем в настоящее время является теория

надёжности. Именно её, науке о надёжности, основные теоретические положения и практические навыки/технологии применения центрируют и/или определяют необходимые подходы, средства, методы и технологии обслуживания (maintenance) каждого конкретного объекта и/или их совокупности [4–7].

Методология “RELIABILITY CENTERED MAINTENANCE (RCM)” появилась в США ещё в середине прошлого века. В настоящее время о ней известно и её пользуются лишь в экономически развитых странах мира. Оно и понятно, поскольку в ней используются стоимостные/денежные показатели и критерии, а также большие массивы, накопленные за достаточно длительный период «честных» наблюдений, статистические данные, причём, достоверные и подтверждённые/верифицированные. Недостаток денежных средств и почти полное отсутствие статистического и процессного мышления в слаборазвитых странах и определяет их место в современном технологическом мире. Следует заметить, что при отсутствии слаборазвитых стран (предположим умозрительно) эта методология, да и многие другие элементы НТП не будут эффективны и результативны. Именно продажи/сбыт устаревшей техники/технологий в слаборазвитые во всех отношениях страны, составляет большую долю прибыли мировых корпораций – производителей машин и систем, штаб-квартиры которых обычно находятся в странах богатых и высокотехнологичных либо в странах аффелированных с ними. Без сомнения прошедший 2020 год – год массового психоза, связанного с мировой эпидемией вируса COVID-19 и его вариаций внёс коррективы в структуру устройства мира, свернул процесс глобализации и отчасти замкнул страны самих на себя. Этот тренд был отмечен ещё в 2015 году [8–9]. При этом в целом НТП не остановлен да и остановить его в принципе уже невозможно.

Далее в докладе рассмотрены основные принципы и положения методологии “RELIABILITY CENTERED MAINTENANCE (RCM)” с позиции просветительских функций, поскольку автору до сих пор не случилось встретиться в Украине с её поклонниками и экспертами. Увы.

## **Литература**

1. Кривошеков, В.Е. «Три уловки» технологии качественного технического обслуживания больших машин/систем / В.Е. Кривошеков // Качество, стандартизация, контроль: теория и практика :

мат. 20-ї Міжнарод. наук.-практ. конф., 07–11 вересня 2020 р., м. Одеса. – К.: АТМ України, 2020. – С. 77–79.

2. Кривошеков, В.Е. Надежность и качество – близнецы-братья В.Е. Кривошеков // Качество, стандартизация, контроль: теория и практика : мат. 19-й Международ. науч.-практ. конф., 09–13 сентября 2019 г., г. Одесса. – К. : АТМ Украины. – 2019. – С. 110–114.

3. Кривошеков, В.Е. Надежность и качество – близнецы-братья В.Е. Кривошеков. – Инженер-механик. – 2019. – №3 (84). – С. 18–19.

4. Krivoshchekov, V.E.. Rreliability centered maintenance (rcm): an introduction to the methodology / V.E. Krivoshchekov // Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд / Праці Всеукр. наук.-техн. конф., 20 травня 2015 р. – м. Миколаїв : НУК, 215. – С. 56–61.

5. Кривошеков, В.Е. Надежный подход в проектировании, постройке и эксплуатации морских судов и их элементов / В.Е. Кривошеков : тез. Международ. науч.-техн. конф. «Прочность материалов и элементов конструкций», посвященной 100-летию со дня рождения Г.С. Писаренко, 28–30 сентября 2010 г. – К. : ИПП НАН Украины, 2010. – С. 117–120.

6. Krivoshchekov, V.E. Up-to-date methodology of the risk-based assessment in the maritime safety management / V.E. Krivoshchekov // Proc. of the Joint Hungarian-Ukrainian-Bulgarian Conf. «Safety-Reliability and Risk of Engineering Plants and Components», May 22–25, 2008ю – Varna, Bulgaria. – P. 1–8.

7. Кривошеков, В.Е. Менеджмент безопасности мореплавания на базе оценки и анализа рисков / В.Е. Кривошеков // Методы менеджмента качества. – 2009. – №7. – С. 34–38.

8. Кривошеков, В.Е. (ОУИЦ). Несколько значимых трендов современных технологий / В.Е. Кривошеков // Методы менеджмента качества. – 2015. – №8. – С. 54–57.

9. Кривошеков, В.Е. Современная парадигма общей технологии машиностроения и эксплуатации техники? / В.Е. Кривошеков : сб. мат. 16-й Международ. науч.-техн. конф. «Машиностроение и техносфера XXI века», 14-20 сентября 2009 г., г. Севастополь. – Донецк : ДонНТУ, 2009. – т. 3. – С. 148–153.

*Лавріненко В.І., Пасічний О.О., Бочечка О.О.,  
Полторацький В.Г., Лещенко О.В., Ситник Б.В.,  
Кошкін О.М.* Інститут надтвердих матеріалів  
ім. В.М. Бакуля НАН України, Київ,  
*Солод В.Ю., Гумаров О.В.* Дніпровський державний  
технічний університет, Кам'янське, Україна

## **ВПЛИВ МОДИФІКУВАННЯ ПОВЕРХНІ ЗЕРЕН КОМПАКТІВ З МІКРОПОРОШКІВ КНБ ОКСИДАМИ ТА ХЛОРИДАМИ НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ПОКАЗНИКИ ШЛІФУВАЛЬНИХ КРУГІВ ПРИ ШЛІФУВАННІ ШВИДКОРІЗАЛЬНОЇ СТАЛІ**

В Інституті надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України розроблений фізико-хімічний синтез виготовлення композиційних компактів на основі мікропорошків кубоніту із розміром зерен менше 3 мкм, і отримання щільного вуглецевого зв'язуючого таких зерен за умов поліконденсації і дифузійної кінетики при високій температурі (~1250 °С) в реакторі і тиску метану нижче атмосферного при наявності молібденового каталізатора [1]. Як наслідок, це дозволило отримувати шліфпорошки вказаних компактів для шліфувального інструменту. Для подальшого підвищення ефективності роботи такого інструменту нами було запропоновано застосовувати шліфпорошки з модифікованою поверхнею зерен компактів. Модифікування поверхні шліфпорошків зерен компактів виконувалося методом рідиннофазного нанесення з насичених розчинів як термостійких оксидів, так і хлоридів [2].

В даній роботі і досліджували експлуатаційні характеристики кругів із зернами шліфпорошків компактів на основі мікропорошків cBN з покриттями на основі сумішей модифікованих, як окремо термостійким оксидом ( $B_2O_3$ ), так і в поєднанні з хлоридами (NaCl). Для обробки була вибрана швидкорізальна сталь марки Р6М5 з розмірами зразка 100x20x8 мм. Режими шліфування без охолодження: швидкість обертання круга – 18 м/с, поперечна подача – 0,05 мм/пдв.хід, повздовжня подача – 0,50 м/хв. (для продуктивності обробки 100 мм<sup>3</sup>/хв.) та 1,00 м/хв. (для продуктивності обробки 200 мм<sup>3</sup>/хв.). Оцінювалася зносостійкість шліфувального інструменту за показником відносних витрат зерен ( $q$ ) та шорсткість обробленої поверхні ( $Ra$ ). Результати наведені в табл. 1.

**Таблиця 1 – Експлуатаційні показники шліфувальних кругів на полімерній зв'язці В2-08 із відносною концентрацією зерен у 100% із різними варіантами модифікації поверхні зерен компактів на основі мікропорошків сVN**

Модифікування поверхні зерен компактів у робочому шарі кубонітових кругів 12А2-45° 125×5×3×32	Продуктивність обробки			
	100 мм <sup>3</sup> /хв.		200 мм <sup>3</sup> /хв.	
	<i>q</i> , мг/Г	<i>Ra</i> , мкм	<i>q</i> , мг/Г	<i>Ra</i> , мкм
Компакт 160/125 без модифікування поверхні зерен (100%)	1,46	0,35	2,04	0,30
Компакт 160/125 з модифікуванням сумішшю (В <sub>2</sub> О <sub>3</sub> + NaCl) (100%)	0,93	0,29	2,61	0,36
КВ 125/100 В2-08 100 без модифікування поверхні зерен	1,12	0,35	2,66	0,41
Модифікування В <sub>2</sub> О <sub>3</sub> поверхонь зерен 125/100 при комбінованій суміші КВ 50% та компакту 50%	1,08	0,29	2,84	0,54
Компакт 125/100 з модифікуванням В <sub>2</sub> О <sub>3</sub> поверхні зерен (100%)	2,79	0,43	6,77	0,65
Модифікування сумішшю (В <sub>2</sub> О <sub>3</sub> + NaCl) поверхні зерен при комбінованій суміші (50% зерен компакту 125/100) та (50% АС6 125/100)	2,81	0,32	8,19	0,58

Розглянемо результати табл. 1 з точки зору зносостійкості. Відразу звернемо увагу на те, що у нас є три варіанти груп кругів. В першій групі маємо порівняння круга із зернами компакту 160/125 без модифікування поверхні зерен та із модифікуванням поверхні сумішшю оксиду В<sub>2</sub>О<sub>3</sub> із хлоридом NaCl. Бачимо, що при невеликій продуктивності обробки модифікування поверхні компакту дає ефект, але коли продуктивність зростає, то модифікування погіршує зносостійкість інструменту. Можливо тут грає роль температурний вплив на модифіковану поверхню зерен із зростанням продуктивності обробки.

Тепер розглянемо групу кругів із зернистістю шліфпорошків в кругах 125/100 (див. середню групу кругів в табл. 1). Тут ми можемо порівняти зерна кубоніта КВ без модифікації, компакту з модифікуванням його поверхні оксидом В<sub>2</sub>О<sub>3</sub> та комбінованою сумішшю КВ 50% та компакту 50%, зерна яких модифіковані В<sub>2</sub>О<sub>3</sub>. Цікавим тут є те, що часткова заміна зерен кубоніту КВ на 50% зерен компактів при загальному модифікуванні поверхонь усіх зерен оксидом В<sub>2</sub>О<sub>3</sub> на продуктивності обробки 100 мм<sup>3</sup>/хв. навіть дещо зменшує знос круга. Але, як і у попередньому випадку, із збільшенням продуктивності ситуація змінюється на протилежну. А ось якщо ми застосовуємо виключно зерна компакту із модифікованою тим же ок-

сидом поверхнею, то знос круга зростає майже у 2,5 рази в обох випадках продуктивності обробки у порівнянні із кругом з комбінованою сумішшю зерен (КВ+Кп) із тією ж модифікацією.

Третя група представлена у нас кругом із комбінованою сумішшю (50% зерен компакту 125/100) та (50% алмазних зерен АС6 125/100) модифікованих хлоридом NaCl у суміші із В<sub>2</sub>О<sub>3</sub>. Бачимо, що тут знос круга є найвищим за всі варіанти, представлені в табл. 1, а це означає, що для обробки швидкорізальної сталі такий варіант є непридатним. Основним висновком з наведеного, є те, що модифікування поверхні зерен компакту може мати ефект лише при невеликій продуктивності обробки.

**Таблиця 2 – Показники шорсткості обробленої поверхні сталі Р6М5 шліфувальними кругами на полімерній зв'язці В2-08 із відносною концентрацією зерен у 100% із різними варіантами модифікації поверхні компактів з мікропорошків сVN (при продуктивності обробки у 200 мм<sup>3</sup>/хв.)**

Модифікування поверхні зерен компактів у робочому шарі кубонітових кругів 12А2-45° 125×5×3×32	Показники шорсткості			
	<i>R<sub>a</sub></i> , мкм	<i>R<sub>max</sub></i> , мкм	<i>S<sub>m</sub></i> , мкм	<i>t</i> 50,%
Компакт 160/125 без модифікування поверхні зерен (100%)	0,30	2,36	37	78,27
Компакт 160/125 з модифікуванням сумішшю (В <sub>2</sub> О <sub>3</sub> + NaCl) поверхні зерен (100%)	0,36	2,39	41	74,21
КВ 125/100 В2-08 100 без модифікування поверхні зерен	0,41	2,90	34	71,65
Модифікування В <sub>2</sub> О <sub>3</sub> поверхонь зерен при комбінованій суміші КВ 50% та компакту 50%	0,54	3,47	45	70,50
Компакт 125/100 з модифікуванням В <sub>2</sub> О <sub>3</sub> поверхні зерен (100%)	0,65	5,96	39	24,85
Модифікування сумішшю (В <sub>2</sub> О <sub>3</sub> + NaCl) поверхні зерен при комбінованій суміші (50% зерен компакт 125/100) та (50% алмазних зерен АС6 125/100)	0,58	3,63	47	56,35

Тепер розглянемо особливості показників шорсткості обробленої поверхні. Звернемо увагу на те, що при невеликій продуктивності у 100 мм<sup>3</sup>/хв. шліфувальні круги із зернами без модифікування поверхні дають більші значення шорсткості обробленої поверхні за параметром *R<sub>a</sub>*, аніж при модифікованих зернах. При значно

вищій продуктивності у  $200 \text{ мм}^3/\text{хв.}$  такого ефекту немає. Тобто і тут є повторення того, що ми вже бачили вище по зносу кругу.

Звернемо також увагу на те, як різниться наповненість шорсткої поверхні за таким параметром кривої опорної поверхні, як  $t50$  при наявності модифікування поверхні зерен компактів і без неї. Тут ми можемо порівняти дані по компакт 160/125 (табл. 2), де показник  $t50$  складає майже 75%. Тобто тут оброблювана поверхня формується із високим показником несучої здатності. У випадку модифікування поверхні компакту оксидом  $\text{V}_2\text{O}_3$  або сумішшю оксиду  $\text{V}_2\text{O}_3$  з хлоридом  $\text{NaCl}$  такий показник значно зменшується.

### **Література**

1. Лавриненко, В.И. Новый абразивный инструментальный материал для полирования и шлифования инструментальных сталей / В.И. Лавриненко, В.Г. Полторацкий, В.Ю. Солод // Оборудование и инструмент для профессионалов. – 2017. – №2. – С. 32–36.

2. Лавріненко, В.І. Модифіковані термостійкими оксидами і хлоридами шліфпорошки синтетичного алмазу в шліфувальному інструменті / В.І. Лавріненко, О.О. Пасічний, В.Г. Полторацький, О.В. Лещенко // Качество, стандартизация, контроль: теория и практика : мат. 20-й Международ. наук.-практ. конф., 07–11 вересня 2020 р., м. Одеса. – К. : АТМ України, 2020. – С. 87–88.

*Лавріненко В.І., Пасічний О.О., Полторацький В.Г.* Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, Київ,  
*Солод В.Ю.* Дніпровський державний технічний університет, Кам'янське,  
*Доброскок В.Л., Островерх Є.В.* Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

## **ВПЛИВ МОДИФІКУВАННЯ ПОВЕРХНІ АЛМАЗІВ ОКСИДАМИ ТА ХЛОРИДАМИ НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ПОКАЗНИКИ ШЛІФУВАЛЬНИХ КРУГІВ ПРИ ШЛІФУВАННІ ТВЕРДОГО СПЛАВУ**

Для подальшого підвищення ефективності роботи алмазного шліфувального інструменту нами було запропоновано застосовувати шліфпорошки з модифікованою поверхнею. Модифікування поверхні шліфпорошків алмазних зерен виконувалося методом рідиннофазного нанесення з насичених розчинів як термостійких оксидів

( $B_2O_3$ ,  $Al_2O_3$ ) або хлоридів ( $CaCl_2$ ,  $NaCl$ ,  $BaCl_2$ ,  $MgCl_2$ ,  $FeCl_3$ ), так і їх сумішей ( $B_2O_3+CaCl_2$ ,  $B_2O_3+NaCl$ ) [1, 2].

Слід вказати, що питанням модифікування зерен алмазних порошків нині приділяється увага, наприклад [3] покриттю частинок алмазу атомним шаром оксиду алюмінію. Це дозволяє підвищити стійкість алмазів до окислення. Тобто показано [3], що властивості алмазів можливо покращити за допомогою інженерії поверхні, що власне і було метою даної роботи.

Досліджувалися експлуатаційні характеристики алмазних кругів із алмазами з покриттями на основі сумішей модифікованих, як окремо термостійкими оксидами, так і в поєднанні з хлоридами, шліфпорошків синтетичного алмазу марки АС6 125/100. Для обробки був вибраний важкооброблюваний вольфрамо-титано-кобальтовий твердий сплав марки Т15К6 з розмірами зразка  $63 \times 15 \times 7$  мм. Режими шліфування: швидкість обертання круга – 18 м/с, поперечна подача – 0,05 мм/пдв. хід, повздовжня подача – 0,57 м/хв. (для продуктивності обробки  $200 \text{ мм}^3/\text{хв.}$ ) та 1,14 м/хв. (для продуктивності обробки  $400 \text{ мм}^3/\text{хв.}$ ). Шліфування провадилося без охолодження, щоби не вносити додаткових збурень в процес обробки, оскільки невідомою на даний момент є можливість ймовірної взаємодії хлоридів із складниками технологічної рідини, що може бути предметом подальших досліджень. Оцінювалася зносостійкість шліфувального інструменту за показником відносних витрат алмазів ( $q$ ) та шорсткість обробленої поверхні за показником ( $Ra$ ). Результати випробувань наведені в табл. 1.

Звернемо увагу на те, що 100%-е модифікування поверхні алмазних зерен чистим оксидом  $B_2O_3$  та його сумішшю із хлоридами  $CaCl_2$  або  $NaCl$  на продуктивності обробки  $200 \text{ мм}^3/\text{хв.}$  тільки збільшує знос круга. Звернемо увагу, що модифікування поверхні зерен виключно  $NaCl$  фактично не впливає на знос круга, але таке модифікування у суміші із  $B_2O_3$  є неприпустимим, адже відразу переводить знос круга у область катастрофічного зносу, що не дозволяє навіть провести дослідженні при продуктивності у  $400 \text{ мм}^3/\text{хв.}$  (див. табл. 1).

А яке модифікування дозволяє підвищити зносостійкість алмазного круга? По-перше, це чистими хлоридами  $CaCl_2$  та  $FeCl_3$ . По-друге, комбіноване модифікування, коли 50% зерен модифікується оксидом  $B_2O_3$ , а інші 50% зерен модифікуються хлоридом  $MgCl_2$ , або оксидом  $Al_2O_3$ . Розташуємо вказане модифікування в ряд по мірі збільшення зносостійкості:

*Без модифікування –  $FeCl_3$ – $B_2O_3$ / $MgCl_2$ – $CaCl_2$ – $B_2O_3$ / $Al_2O_3$ .*

**Таблиця 1 – Експлуатаційні показники алмазних шліфувальних кругів на полімерній зв'язці В2-08 із відносною концентрацією зерен у 100% із різними варіантами модифікації поверхні алмазних зерен марки АС6 125/100**

Модифікування поверхні алмазних зерен у робочому шарі алмазних кругів 12А2-45° 125x5x3x32	Продуктивність обробки			
	200 мм <sup>3</sup> /хв.		400 мм <sup>3</sup> /хв.	
	q, мг/Г	Ra, мкм	q, мг/Г	Ra, мкм
Модифікування В <sub>2</sub> О <sub>3</sub> поверхні зерен (50% зерен) та модифікування Аl <sub>2</sub> О <sub>3</sub> поверхні зерен (50%)	7	0,37	17	0,43
Модифікування СаСl <sub>2</sub> поверхні зерен (100%)	9	0,37	20	0,41
Модифікування В <sub>2</sub> О <sub>3</sub> поверхні зерен (50% зерен) та модифікування МgСl <sub>2</sub> поверхні зерен (50%)	12	0,40	24	
Модифікування FeСl <sub>3</sub> поверхні зерен (100%)	15	0,48	26	0,43
АС6 125/100 В2-08 100 без модифікування поверхні зерен	17	0,31	37	0,52
Модифікування NaСl поверхні зерен (100%)		0,33	46	0,44
Модифікування В <sub>2</sub> О <sub>3</sub> поверхні зерен (100%)	25	0,45	32	0,49
Модифікування сумішшю (В <sub>2</sub> О <sub>3</sub> + СаСl <sub>2</sub> ) поверхні зерен (100%)	22		43	0,40
Модифікування сумішшю (В <sub>2</sub> О <sub>3</sub> + NaСl) поверхні зерен (100%)	343		–	–

Різниця в зносостійкості для першої (без модифікування) і останньої (для В<sub>2</sub>О<sub>3</sub>/Аl<sub>2</sub>О<sub>3</sub>) ланки вказаного ряду складає 2,43, тобто зносостійкість алмазного круга при модифікуванні комбінацією В<sub>2</sub>О<sub>3</sub>/Аl<sub>2</sub>О<sub>3</sub> підвищується у 2,43 рази. Цей ряд для продуктивності 200 мм<sup>3</sup>/хв.

При збільшенні продуктивності в 2 рази фактично по розташуванню цей ряд не змінився, але в нього ввійшло модифікування оксидом В<sub>2</sub>О<sub>3</sub>:

*Без модифікування – В<sub>2</sub>О<sub>3</sub>–FeСl<sub>3</sub>–В<sub>2</sub>О<sub>3</sub>/МgСl<sub>2</sub>–СаСl<sub>2</sub>–В<sub>2</sub>О<sub>3</sub>/Аl<sub>2</sub>О<sub>3</sub>.*

Для більш високої продуктивності обробки у 400 мм<sup>3</sup>/хв. різниця в зносостійкості для першої (без модифікування) і останньої (для В<sub>2</sub>О<sub>3</sub>/Аl<sub>2</sub>О<sub>3</sub>) ланки вказаного ряду складає вже 2,18, тобто зносостійкість алмазного круга при модифікуванні комбінацією В<sub>2</sub>О<sub>3</sub>/Аl<sub>2</sub>О<sub>3</sub> підвищується у 2,18 рази.

Таким чином, модифікування поверхні алмазних зерен комбінацією  $B_2O_3/Al_2O_3$  гарантовано у 2 рази збільшує зносостійкість алмазних кругів, як за невеликої, так і за підвищеної продуктивності обробки.

Опосередкованим висновком з наведеного вище є те, що при невеликій продуктивності обробки хлориди зустрічаються у наведеному ряді тричі, а оксид  $B_2O_3$  – двічі. При збільшенні продуктивності обробки хлориди і вказаний оксид вже зустрічаються однаково – тричі. При цьому в обох випадках продуктивної обробки найкращим є модифікування поверхні алмазних зерен саме комбінацією  $B_2O_3/Al_2O_3$ .

А які варіанти модифікування поверхні алмазних зерен є нецільними з точки зору зносостійкості алмазного інструменту? З табл. 1 виходить, що модифікування хлоридом  $NaCl$ , як окремо, так і у суміші із  $B_2O_3$ , є негативним і застосовувати ці два варіанти модифікування для алмазних порошоків є неприпустимим. Звернемо також увагу і на те, що модифікування сумішшю ( $B_2O_3 + CaCl_2$ ) поверхні зерен також не дає позитивного ефекту.

Тепер розглянемо вплив модифікаторів на шорсткість оброблюваної поверхні. Звернемо увагу, що і тут значний вплив має продуктивність шліфування. Якщо при невеликій продуктивності у  $200 \text{ мм}^3/\text{хв.}$  шліфувальний круг із алмазними зернами без модифікування поверхні дає найменше значення шорсткості обробленої поверхні за параметром  $Ra$  (табл. 2), то при значно вищій продуктивності у  $400 \text{ мм}^3/\text{хв.}$  цей же круг дає вже найбільші значення шорсткості за параметром  $Ra$ . При цьому, у першому випадку, наближені до вихідного круга (в межах 20% відхилення) показники за параметром  $Ra$  (див. табл. 2) мають круги із наступними модифікаціями поверхні алмазних зерен (в ряду по мірі збільшення параметра  $Ra$ ):

*Без модифікування –  $NaCl-B_2O_3/NaCl-(CaCl_2-B_2O_3/Al_2O_3)$ .*

В свою чергу, для продуктивності  $400 \text{ мм}^3/\text{хв.}$  показники шорсткості різняться вже менше і ті, що найменше різняться, можливо розташувати в ряд по мірі збільшення параметра  $Ra$ :

*$B_2O_3/CaCl_2 - (CaCl_2 - B_2O_3/MgCl_2) - (FeCl_3 - B_2O_3/Al_2O_3) - NaCl$ .*

Звернемо також увагу на те, як різниться наповненість шорсткої поверхні за таким параметром кривої опорної поверхні, як  $t50$ . Чим більшими є значення  $t50$ , тим шорстка поверхня має кращу несучу здатність. Для продуктивності обробки у  $200 \text{ мм}^3/\text{хв.}$  цей показник різниться в межах 25% (див. табл. 2), а для  $400 \text{ мм}^3/\text{хв.}$  ця різниця складає вже 63%.

Таким чином, для досягнення гарантованого збільшення зносостійкості алмазних кругів при шліфуванні твердих сплавів мінімум у 2 рази рекомендується провадити модифікацію поверхні алмазних зерен комбінацією оксидів: модифікування  $B_2O_3$  поверхні зерен (50% зерен) та модифікування  $Al_2O_3$  поверхні зерен (50%). Збільшення зносостійкості алмазних кругів максимум у 1,8 рази дає модифікація поверхні алмазних зерен хлоридом  $CaCl_2$ . Третім прийнятним варіантом є модифікація поверхні зерен комбінацією оксиду і хлориду: модифікування  $B_2O_3$  поверхні зерен (50% зерен) та модифікування  $MgCl_2$  поверхні зерен (50%). Ця модифікація поверхні алмазних зерен дає можливість збільшити зносостійкість алмазних кругів у 1,4–1,5 рази.

**Таблиця 2 – Показники шорсткості обробленої поверхні твердого сплаву Т15К6 алмазними шліфувальними кругами на полімерній зв'язці В2-08 із відносною концентрацією зерен у 100% із різними варіантами модифікації поверхні алмазних зерен марки АС6 125/100 (при продуктивності обробки у 200 мм<sup>3</sup>/хв.)**

Модифікування поверхні алмазних зерен у робочому шарі алмазних кругів 12А2-45° 125х5х3х32	Показники шорсткості			
	$Ra$ , мкм	$R_{max}$ , мкм	$Sm$ , мкм	$t_{50}$ ,%
АС6 125/100 В2-08 100 без модифікування поверхні зерен	0,31	2,27	72	48,92
Модифікування $NaCl$ поверхні зерен (100%)	0,33	2,51	56	67,17
Модифікування сумішшю ( $B_2O_3 + NaCl$ ) поверхні зерен (100%)	0,36	2,78	47	48,56
Модифікування $B_2O_3$ поверхні зерен (50% зерен) та модифікування $Al_2O_3$ поверхні зерен (50%)	0,37	1,94	50	57,08
Модифікування $CaCl_2$ поверхні зерен (100%)	0,37	2,28	53	43,82
Модифікування $B_2O_3$ поверхні зерен (50% зерен) та модифікування $MgCl_2$ поверхні зерен (50%)	0,40	2,16	175	68,13
Модифікування $B_2O_3$ поверхні зерен (100%)	0,45	3,26	63	57,26
Модифікування сумішшю ( $B_2O_3 + CaCl_2$ ) поверхні зерен (100%)	0,45	2,89	64	50,36
Модифікування $FeCl_3$ поверхні зерен (100%)	0,48	4,09	75	56,48

## Література

1. Лавріненко, В.І. Модифіковані термостійкими оксидами і хлоридами шліфпорошки синтетичного алмазу в шліфувальному інструменті / В.І. Лавріненко, О.О. Пасічний, В.Г. Полторацький, О.В. Лещенко // *Качество, стандартизация, контроль: теория и практика* : мат. 20-й Международ. наук.-практ. конф., 07–11 вересня 2020 р., г. Одеса. – К. : АТМ України, 2020. – С. 87–88.
2. Лавріненко, В.І. Визначення оксидів, призначених для модифікування поверхні алмазних зерен, за їх функціональними характеристиками / В.І. Лавріненко, В.Ю. Солод, І.С. Кашинський, В.Л. Доброскок // *Надтверді мат.* – 2020. – №6. – С. 66–73.
3. Domingues, D. Enhancing the oxidation resistance of diamond powder by the application of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  conformal coat by atomic layer deposition / D. Domingues, H. Tiznado, N.A. Borbon-Nunes, F. Munoz-Munoz, J.M. Romo-Herrera, G. Soto // *Diamond and Related Mat.* – 2016. – Vol. 69. – P. 108–113.

*Лавріненко В.І., Пасічний О.О., Скрябін В.В.,  
Бочечка О.О., Полторацький В.Г.* Інститут надтвердих  
матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, Київ,  
*Солод В.Ю., Кашинський І.С.* Дніпровський державний  
технічний університет МОН України, Кам'янське, Україна

## **ВПЛИВ МОДИФІКУВАННЯ ПОВЕРХНІ ЗЕРЕН КУБІЧНОГО НІТРИДУ БОРУ ОКСИДАМИ ТА ХЛОРИДАМИ НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ПОКАЗНИКИ ШЛІФУВАЛЬНИХ КРУГІВ ПРИ ШЛІФУВАННІ ШВИДКОРІЗАЛЬНОЇ СТАЛІ**

Для подальшого підвищення ефективності роботи шліфувального інструменту з кубічного нітриду бору нами було запропоновано застосовувати шліфпорошки з модифікованою поверхнею. Модифікування поверхні шліфпорошків зерен кубоніту виконувалося методом рідиннофазного нанесення з насичених розчинів як термостійких оксидів ( $\text{B}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) або хлоридів ( $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{NaCl}$ ,  $\text{BaCl}_2$ ,  $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{FeCl}_3$ ), так і їх сумішей ( $\text{B}_2\text{O}_3+\text{CaCl}_2$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3+\text{NaCl}$ ) [1, 2].

Досліджували експлуатаційні характеристики кубонітових кругів із зернами шліфпорошків кубоніту марки KB 125/100 з покриттями на основі сумішей модифікованих, як окремо термостійким

оксидом ( $B_2O_3$ ), так і в поєднанні з хлоридами ( $NaCl$ ). Шліфували швидкорізальна сталь марки Р6М5 з розмірами зразка 100x20x8 мм. Режими шліфування без охолодження: швидкість обертання круга – 18 м/с, поперечна подача – 0,05 мм/пдв. хід, повздовжня подача – 0,50 м/хв. (для продуктивності обробки 100 мм<sup>3</sup>/хв.) та 1,00 м/хв. (для 200 мм<sup>3</sup>/хв.). Оцінювалася зносостійкість шліфувального інструменту за показником відносних витрат алмазів ( $q$ ) та шорсткість обробленої поверхні за показником ( $Ra$ ). Результати випробувань наведені в табл. 1.

**Таблиця 1 – Експлуатаційні показники кубонітових шліфувальних кругів на полімерній зв'язці В2-08 із відносною концентрацією зерен у 100% із різними варіантами модифікації поверхні кубонітових зерен марки КВ 125/100**

Модифікування поверхні зерен кубоніту у робочому шарі кубонітових кругів 12А2-45° 125x5x3x32	Продуктивність обробки			
	100 мм <sup>3</sup> /хв.		200 мм <sup>3</sup> /хв.	
	$q$ , мг/г	$Ra$ , мкм	$q$ , мг/г	$Ra$ , мкм
Модифікування $B_2O_3$ поверхні зерен (50% зерен) та модифікування $Al_2O_3$ поверхні зерен (50%)	0,73	0,29	2,18	0,34
Модифікування сумішшю ( $B_2O_3 + NaCl$ ) поверхні зерен (100%)	0,79	0,31	2,80	0,44
Модифікування $B_2O_3$ поверхні зерен (100%)	0,90	0,23	2,15	0,42
Модифікування $NaCl$ поверхні зерен (100%)	1,01	0,25	2,28	0,52
Модифікування $B_2O_3$ поверхонь зерен при комбінованій суміші КВ 50% та компакту 50%	1,08	0,29	2,84	0,54
КВ 125/100 В2-08 100 без модифікування поверхні зерен	1,12	0,35	2,66	0,41

Звернемо увагу на те, що в усіх випадках модифікування поверхні кубонітових зерен як чистим оксидом  $B_2O_3$ , так і його сумішшю із хлоридом  $NaCl$ , а також у сукупності із оксидом  $Al_2O_3$  на обох продуктивностях обробки зменшує знос круга. Тут хіба що модифікування поверхні зерен хлоридом  $NaCl$  у суміші із  $B_2O_3$  при зростанні продуктивності обробки до 200 мм<sup>3</sup>/хв. є несприятливим, адже знос круга зростає у порівнянні з кругом з не модифікованим зернами (див. табл. 1).

Які саме модифікування дозволяють підвищити зносостійкість кругу: по-перше, це чистим хлоридом NaCl; по-друге, чистим оксидом  $B_2O_3$ , або комбінованим модифікуванням, коли 50% зерен модифікується оксидом  $B_2O_3$ , а інші 50% зерен модифікуються хлоридом NaCl. А найкращим виявилось комбіноване модифікування, коли 50% зерен модифікується оксидом  $B_2O_3$ , а інші 50% зерен модифікуються оксидом  $Al_2O_3$ . Ряд вказаного модифікування для продуктивності  $100 \text{ мм}^3/\text{хв.}$  по мірі збільшення зносостійкості є наступним:

*Без модифікування – NaCl– $B_2O_3$ – $B_2O_3$ /NaCl– $B_2O_3$ / $Al_2O_3$ .*

Відношення зносостійкості для першої (без модифікування) і останньої (для  $B_2O_3/Al_2O_3$ ) ланки ряду складає 1,53, тобто вона підвищується у 1,53 рази.

А що буде при збільшенні продуктивності в 2 рази? З цього ряду випало комбіноване модифікування  $B_2O_3/NaCl$ , а  $B_2O_3/Al_2O_3$  та  $B_2O_3$  помінялися місцями і найбільш ефективним стало модифікування поверхні зерен оксидом  $B_2O_3$  і тут цей ряд має вигляд:

*Без модифікування – NaCl– $B_2O_3/Al_2O_3$ – $B_2O_3$ .*

Для більш високої продуктивності обробки у  $200 \text{ мм}^3/\text{хв.}$  різниця в зносостійкості для першої (без модифікування) і останньої (для  $B_2O_3$ ) ланки вказаного ряду складає вже 1,24, тобто зносостійкість кубонітового кругу при модифікуванні зерен оксидом  $B_2O_3$  підвищується у 1,24 рази. А при модифікуванні поверхні кубонітових зерен комбінацією  $B_2O_3/Al_2O_3$  таке підвищення зносостійкості кругів склало 1,22, що ненабагато відрізняється від попереднього значення. Тобто фактично, як за невеликої, так і за підвищеної продуктивності обробки кращим є комбіноване модифікування поверхні кубонітових зерен комбінацією  $B_2O_3/Al_2O_3$ .

Розглянемо тепер особливості шорсткості оброблюваної поверхні. Звернемо увагу, що і тут значний вплив має продуктивність шліфування. Якщо при невеликій продуктивності у  $100 \text{ мм}^3/\text{хв.}$  шліфувальний круг із зернами КНБ без модифікування поверхні дає найбільше значення шорсткості обробленої поверхні за параметром  $Ra$ , то при значно вищій продуктивності у  $200 \text{ мм}^3/\text{хв.}$  цей же круг дає вже майже найменші значення шорсткості за параметром  $Ra$  (табл. 2). При цьому, у першому випадку, ряд модифікаторів по мірі зменшення параметру  $Ra$  має наступний вигляд:

*Без модифікування –  $B_2O_3/NaCl$ – $B_2O_3/Al_2O_3$ –NaCl– $B_2O_3$ .*

В свою чергу, для продуктивності  $200 \text{ мм}^3/\text{хв.}$  показники шорсткості (див. табл. 2) вже більше різняться і їх можливо розташувати в ряд по мірі зменшення параметру  $Ra$ :

**Таблиця 2 – Показники шорсткості обробленої поверхні швидкорізальної сталі Р6М5 кубонітовими шліфувальними кругами на полімерній зв'язці В2-08 із відносною концентрацією зерен у 100% із різними варіантами модифікації поверхні кубонітових зерен марки КВ 125/100 (при продуктивності обробки у 200 мм<sup>3</sup>/хв.)**

Модифікування поверхні зерен кубоніту у робочому шарі кубонітових кругів 12А2-45° 125х5х3х32	Показники шорсткості:			
	<i>Ra</i> , мкм	<i>Rmax</i> , мкм	<i>Sm</i> , мкм	<i>t50</i> ,%
Модифікування В <sub>2</sub> О <sub>3</sub> поверхні зерен (50% зерен) та модифікування Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> поверхні (50%)	0,34	2,82	35	52,54
КВ 125/100 В2-08 100 без модифікування поверхні зерен	0,41	2,90	34	71,65
Модифікування В <sub>2</sub> О <sub>3</sub> поверхні зерен (100%)	0,42	3,25	41	40,71
Модифікування сумішшю (В <sub>2</sub> О <sub>3</sub> + NaCl) поверхні зерен (100%)	0,44	3,35	37	39,58
Модифікування NaCl поверхні зерен (100%)	0,52	3,69	44	60,21
Модифікування В <sub>2</sub> О <sub>3</sub> поверхонь зерен при комбінованій суміші КВ 50% та компакту 50%	0,54	3,47	45	70,50

Звернемо також увагу на те, як різниться наповненість шорсткої поверхні за таким параметром кривої опорної поверхні, як *t50*. Чим більшими є значення *t50*, тим шорстка поверхня має кращу несучу здатність. Причому, як і на алмазних кругах, при меншій продуктивності обробки у 100 мм<sup>3</sup>/хв. цей показник різниться в межах 12%, а для 200 мм<sup>3</sup>/хв. ця різниця складає вже 31% (див. табл. 2).

### **Література.**

1. Лаврінченко, В.І. Модифіковані термостійкими оксидами і хлоридами шліфпорошки синтетичного алмазу в шліфувальному інструменті / В.І. Лаврінченко, О.О. Пасічний, В.Г. Полторацький, О.В. Лещенко // *Якість, стандартизація, контроль: теорія і практика* : мат. 20-й Міжнарод. наук.-практ. конф., 07–11 вересня 2020 р., г. Одеса. – К. : АТМ України, 2020. – С. 87–88.
2. Лаврінченко, В.І. Визначення оксидів, призначених для модифікування поверхні алмазних зерен, за їх функціональними характеристиками / В.І. Лаврінченко, В.Ю. Солод, І.С. Кашинський, В.Л. Доброскок // *Надтверді мат.* – 2020. – №6. – С. 66–73.

*Лавріненко В.І., Пасічний О.О., Скрябін В.О.,  
Бочечка О.О., Полторацький В.Г.* Інститут надтвердих  
матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, Київ,  
*Солод В.Ю., Музичка Д.Г.* Дніпровський державний  
технічний університет МОН України, Кам’янське, Україна

## **ВПЛИВ ХЛОРИДІВ, ПРИ МОДИФІКУВАННІ ПОВЕРХНІ ЗЕРЕН НТМ, НА ПОКАЗНИКИ ШОРСТКОСТІ ОБРОБЛЕНОЇ ПОВЕРХНІ ПРИ ШЛІФУВАННІ КРУГАМИ ІЗ ТАКИМИ ЗЕРНАМИ**

Для подальшого підвищення ефективності роботи шліфувального інструменту нами було запропоновано застосовувати шліфпорошки з модифікованою поверхнею. Модифікування поверхні шліфпорошків зерен надтвердих матеріалів (НТМ) виконувалося методом рідиннофазного нанесення з насичених розчинів як термостійких оксидів ( $B_2O_3$ ,  $Al_2O_3$ ) або хлоридів ( $CaCl_2$ ,  $NaCl$ ,  $BaCl_2$ ,  $MgCl_2$ ,  $FeCl_3$ ), так і їх сумішей ( $B_2O_3+CaCl_2$ ,  $B_2O_3+NaCl$ ) [1].

Нагадаємо, що у випадку застосування при алмазній обробці мастильно-охолоджувальних технологічних середовищ (МОТС) для підвищення мастильної дії у них вводять домішки, які містять хімічно активні елементи: хлор, сірку, йод та ін. Механізм мастильної дії домішок заснований на їх здатності утворювати в зонах контакту тверді мастильні шари із відповідних неорганічних солей металу, тим самим хімічно модифікується поверхня. За такі домішки можна розглядати солі хлоридів –  $CaCl_2$ ,  $NaCl$ ,  $BaCl_2$ ,  $MgCl_2$ ,  $FeCl_3$ , з яких найбільш екологічними є  $CaCl_2$  і  $NaCl$ . В цілому, за аналогією до описаної дії МОТС саме і можливо розглядати вказану вище подвійну модифікацію поверхні зерен алмазних шліфпорошків сумішшю оксидів і хлоридів, яка може дати додатковий ефект при модифікуванні поверхні алмазів [2].

В даній роботі досліджувалося, що буде відбуватися із показниками шорсткості обробленої поверхні, коли в робочому шарі кругів є шліфпорошки НТМ однієї зернистості, але із модифікованою поверхнею їх зерен, причому звертали більшу увагу саме на дію хлоридів.

На першому етапі, досліджували показники шорсткості обробленої поверхні при застосуванні алмазних кругів із алмазами АС6 125/100 модифікованими, як оксидами ( $B_2O_3$ ,  $Al_2O_3$ ), так і в поєднанні з хлоридами ( $NaCl$ ,  $MgCl_2$ ,  $FeCl_3$ ,  $CaCl_2$ ). Для обробки був вибраний твердий сплав марки Т15К6. Режими шліфування без

охолодження: швидкість обертання круга – 18 м/с, поперечна подача – 0,05 мм/пдв. хід, повздовжня подача – 1,14 м/хв.

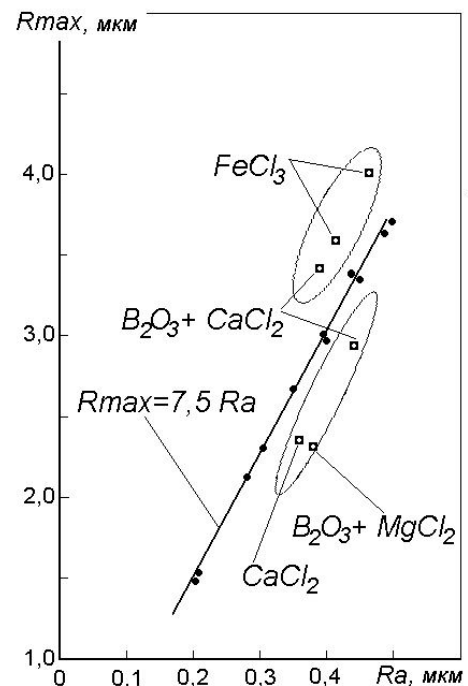
Шорсткість оброблюваних поверхонь оцінювали за наступними параметрами: середнього арифметичного відхилення профілю мікронерівностей,  $Ra$ , мкм; максимальної висоти мікронерівностей в межах базової довжини,  $R_{max}$ , мкм; середнього кроку мікронерівностей вздовж базової лінії,  $Sm$ , мкм.

Досліджено, що у цілому, алмазні круги із наступними модифікаціями можливо розташувати в ряд по мірі зменшення параметра  $Ra$ :

Без модифікування –  $B_2O_3/Al_2O_3-NaCl-CaCl_2-B_2O_3/MgCl_2-B_2O_3/CaCl_2$ .

Як бачимо, модифікування хлоридами сприяє більшому зниженню шорсткості. Але тепер звернемо увагу на вплив модифікаторів поверхні алмазних зерен на відхилення від стандартних залежностей  $Sm = f(Ra)$  та  $R_{max} = f(Ra)$ . Нами встановлено, що майже уся сукупність даних по кроку мікронерівностей обробленої поверхні вкладається у залежність  $Sm = 145Ra$ . Разом з тим, є і певні відхилення від цієї залежності і пов'язані вони якраз із хлоридами:  $CaCl_2$  та  $MgCl_2$ . При цьому, всі відхилення відбуваються в більший бік. Тобто хлориди, сприяючи зменшенню шорсткості, разом з тим збільшують крок мікронерівностей обробленої поверхні. Проаналізуємо тепер залежність максимальної висоти мікронерівностей від параметру шорсткості  $Ra$  (рис. 1). Аналогічно тут також майже усі дані вкладаються у одну залежність –  $R_{max} = 7,5Ra$ . Разом з тим, і тут є певні відхилення. Цікаво, що ці відхилення відбуваються майже паралельно основній прямій з обох боків. Але ми і тут відзначимо, що усі ці відхилення відбуваються саме при наявності хлоридів:  $CaCl_2$ ,  $MgCl_2$  та  $FeCl_3$ .

Тобто, при визначенні речовин, якими можливо модифікувати поверхні алмазних зерен, треба враховувати можливий вплив хло-



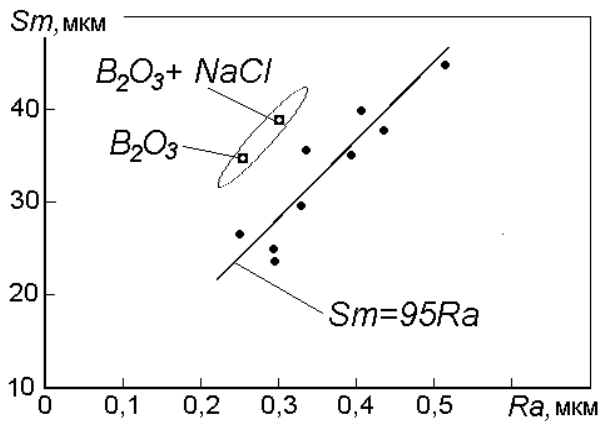
**Рис. 1 – Кореляційна залежність між показниками шорсткості обробленої поверхні твердого сплаву Т15К6: максимальною висотою мікронерівностей  $R_{max}$  та параметром  $Ra$**

ридів на відхилення від узагальнених даних. Розглянемо це далі для модифікованих зерен шліфпорошків з кубічного нітриду бору.

На другому етапі, досліджували показники шорсткості обробленої поверхні при застосуванні кубонітових кругів із зернами кубоніту KB 125/100 з покриттями на основі сумішей модифікованих, як оксидами ( $B_2O_3$ ,  $Al_2O_3$ ), так і в поєднанні з хлоридами ( $NaCl$ ). Шліфували без охолодження швидкорізальну сталь марки Р6М5 на режимах: швидкість обертання круга – 18 м/с, поперечна – 0,05 мм/пдв. хід і повздовжня подача – 1,0 м/хв.

Звернемо увагу, що і тут варіанти модифікування можливо розташувати в ряд по мірі зменшення параметра  $Ra$ :

$NaCl-B_2O_3/NaCl-B_2O_3$  – Без модифікування –  $B_2O_3/Al_2O_3$ .



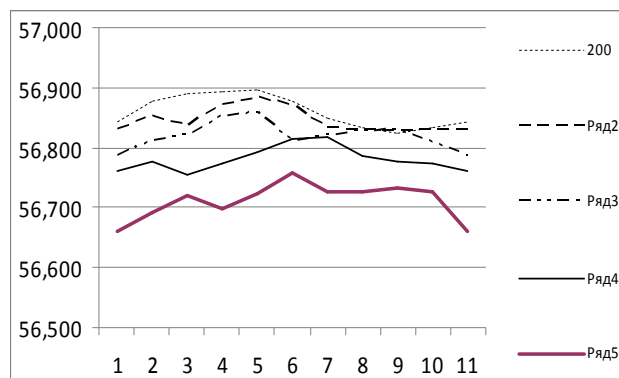
**Рис. 2 – Кореляційна залежність між показниками шорсткості обробленої поверхні швидкорізальної сталі Р6М5: кроком мікронерівностей  $Sm$  та параметром  $Ra$**

Тобто на кубонітових зернах модифікування хлоридами на зменшення шорсткості не впливає. Тепер знову звернемо увагу на вплив модифікаторів поверхні зерен на відхилення від стандартних залежностей. З рис. 2 видно, що майже уся сукупність даних по кроку мікронерівностей обробленої поверхні вкладається у залежність  $Sm=95Ra$ . Разом з тим, є і певні відхилення від цієї залежності і пов'язані вони якраз із хлоридом  $NaCl$  та оксидом  $B_2O_3$ . При цьому відзначимо, що ці дві точки відхилення разом йдуть паралельно основній прямій тобто нахил прямої зберігається, але вона зміщується у більший бік. Зазначимо також, що саме ці два модифікатора і знаходяться у лівій частині вказаного вище ряду по шорсткості. Тобто, як хлорид  $NaCl$ , так оксид  $B_2O_3$ , окремо, збільшують і висотний і кроковий показники шорсткості.

В чому причина такої поведінки показників шорсткості при застосуванні хлоридів? На наш погляд, відповідь на це полягає у особливостях хвильової формозміни ріжучої поверхні кругів у коловому напрямку в процесі шліфування. Зазвичай реально форма профілю ріжучої поверхні круга у коловому напрямку набуває форму хвилі [3]. Саме такі профілі робочого шару і формуються при шліфуванні кругами із зернами з модифікацією їх поверхні оксидом

$B_2O_3$  або комбінацією  $B_2O_3/Al_2O_3$ . Разом з тим, при модифікації поверхні зерен із застосуванням хлоридів відбувається відмінність у формоутворенні ріжучої поверхні кругів і, при цьому, формується хоч і в певній мірі хвильовий, але більше ламаний «пилкоподібний» профіль (рис. 3), що, як наслідок, і призводить до тих відхилень, на які ми звертали увагу вище для модифікації поверхні зерен хлоридами.

Таким чином, при визначенні речовин, якими можливо модифікувати поверхні зерен шліфпорошків НТМ, треба враховувати можливий вплив хлоридів на показники шорсткості та відхилення від узагальнених даних в сталих залежностях показників шорсткості  $R_{max} = f(Ra)$  та  $Sm = f(Ra)$ .



**Рис. 3 – Утворення ламаного хвильового профілю круга в коловому напрямку (1-10 – розгортка круга) вздовж ріжучого шару при модифікованих алмазних зернах хлоридом  $CaCl_2$**

### Література

1. Лавріненко, В.І. Модифіковані термостійкими оксидами і хлоридами шліфпорошки синтетичного алмазу в шліфувальному інструменті / В.І. Лавріненко, О.О. Пасічний, В.Г. Полторацький, О.В. Лещенко // *Якість, стандартизація, контроль: теорія і практика* : мат. 20-й Міжнарод. наук.-практ. конф., 07–11 вересня 2020 р., г. Одеса. – К. : АТМ України, 2020. – С. 87–88.

2. Лавріненко, В.І. Визначення оксидів, призначених для модифікування поверхні алмазних зерен, за їх функціональними характеристиками / В.І. Лавріненко, В.Ю. Солод, І.С. Кашинський, В.Л. Доброскок // *Надтверді мат.* – 2020. – №6. – С. 66–73.

3. Пасічний, О.О. Вплив хвильової формозміни різальної поверхні алмазних кругів у коловому напрямку на параметри шорсткості обробленої поверхні / О.О. Пасічний, В.І. Лавріненко // *Сверхтв. мат.* – 2019. – №4. – С. 83–86.

*Лавріненко В.І., Пасічний О.О., Скрябін В.О.,  
Полторацький В.Г., Кошкін О.М.* Інститут надтвердих  
матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, Київ, Україна  
*Проц Л.А.* Ужгородський національний  
університет, Ужгород, Україна

## **ВПЛИВ ФОРМОЗМІНИ РІЖУЧОЇ ПОВЕРХНІ ШЛІФУВАЛЬНОГО КРУГУ У КОЛОВОМУ НАПРЯМКУ ПРИ ШЛІФУВАННІ НА ЗМІНУ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ ОТРИМАНОЇ ШОРСТКОЇ ПОВЕРХНІ**

У процесі шліфування, поряд із формозміною ріжучої поверхні круга в поперечному (радіальному) напрямку, не менш важливі зміни відбуваються і в подовжньому (коловому) напрямку [1]. Саме подовжній макропрофіль робочої поверхні круга відбиває нерівномірне хвилеподібне формозмінення, що відбувається в процесі шліфування на ріжучій поверхні круга в коловому напрямку.

На те, що ріжуча поверхня круга в коловому напрямку може бути нерівномірною і мати хвилеподібний характер вказувала низка дослідників [2, 3]. Вказану нерівномірність пов'язували зі сталими коливаннями в технологічній системі та пояснювали тим, що в процесі шліфування з'являється змінна складова зусилля різання, яка і приводить до утворення хвиль на робочій поверхні круга, величина яких росте із збільшенням продуктивності шліфування. А оскільки хвилястість є наслідком биття круга, як вважали автори [4], то вона може бути зменшена зниженням жорсткості інструмента або збільшенням площі його контакту з заготовкою, що досягається збільшенням подачі на врізання.

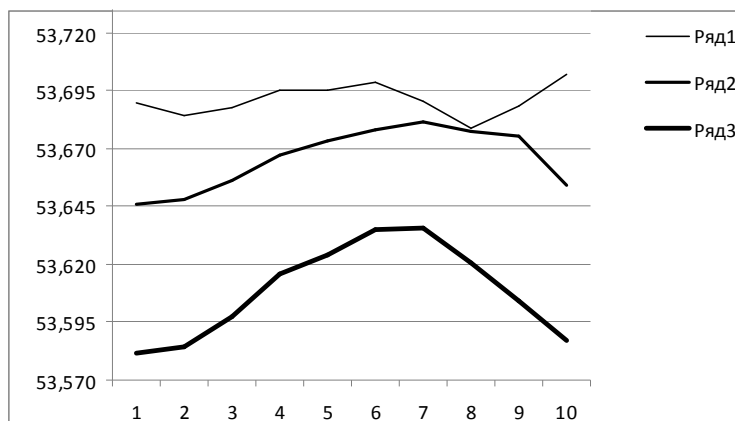
Тобто, хвилястість зафіксована, але вважалось, що це негативне явище, з ним треба вести боротьбу і його позбутися. Між тим, таке нехтування може призвести до істотних похибок у оцінці експлуатаційних показників круга при шліфуванні, оскільки реально форма профілю ріжучої поверхні круга у коловому напрямку набуває форму хвилі і за знімання припуску відповідає тільки її фронт [1]. Тобто круг припрацьовується і розподіляє навантаження на свою ріжучу поверхню, послідовно розташовуючи зерна на цій поверхні. Крім того, звернемо увагу на те, що шорсткість оброблюваної поверхні формується безпосередньо зернами, що знаходяться саме на вершечку хвилі. Разом з тим, як показано вище, вважається,

що оцю саму хвилястість треба знищити. А ось чи буде це краще і як ми можемо реально впливати на хвильове формозміння, це і було метою даної роботи.

Несучу здатність оброблюваної поверхні оцінювали за показником відносної опорної довжині профілю мікронерівностей на рівні 50%  $R_{max}$ ,  $t_{50}$ , %.

Покажемо наявність хвильової формозміни на ріжучій поверхні круга при шліфуванні. Брали два однакових круга 12A2-45 125x5x3x32 на зв'язці В2-08 з зернистістю шліфпорошку 125/100 і з відносною концентрацією зерен 100%, але один алмазний з алмазами марки АС6, а інший кубонітовий з кубонітом марки КВ. Шліфували алмазним кругом твердий сплав Т15К6, а кубонітовим кругом – сталь Р6М5. Встановлено, що як при шліфуванні твердого сплаву Т15К6 шліфувальним кругом із стандартними алмазними зернами, так і при при шліфуванні сталі Р6М5 кубонітовим кругом

формується сталий хвильовий профіль (рис. 1). Тобто хвильове формозміння є природнім як для алмазних, так і для кубонітових кругів. Але виникає питання як отримати змінене, не примусове, а саме природно змінене формозміння? На наш погляд, це можливо зроби-



**Рис. 1 – Утворення сталого хвильового профілю круга в коловому напрямку (1–10 – розгортка круга) вздовж ріжучого шару при шліфуванні стандартними кубонітовими зернами.**

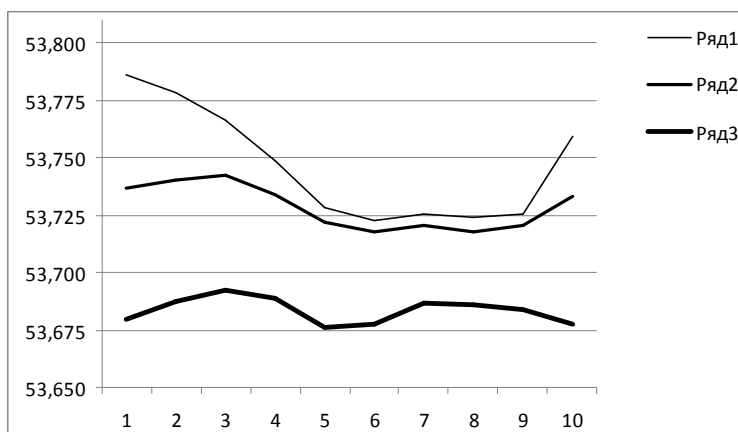
ти зміною саме зерен НТМ: застосуванням зерен компактів з мікропорошків КНБ [5], залученням сумішей шліфпорошків та модифікуванням поверхні зерен НТМ [6]. Саме це ми далі і розглянемо.

Модифікування поверхні шліфпорошків зерен НТМ виконувалося методом рідиннофазного нанесення з насичених розчинів як термостійких оксидів ( $B_2O_3$ ,  $Al_2O_3$ ) або хлоридів ( $CaCl_2$ ,  $NaCl$ ,  $BaCl_2$ ,  $MgCl_2$ ,  $FeCl_3$ ), так і їх сумішей ( $B_2O_3+CaCl_2$ ,  $B_2O_3+NaCl$ ) [6].

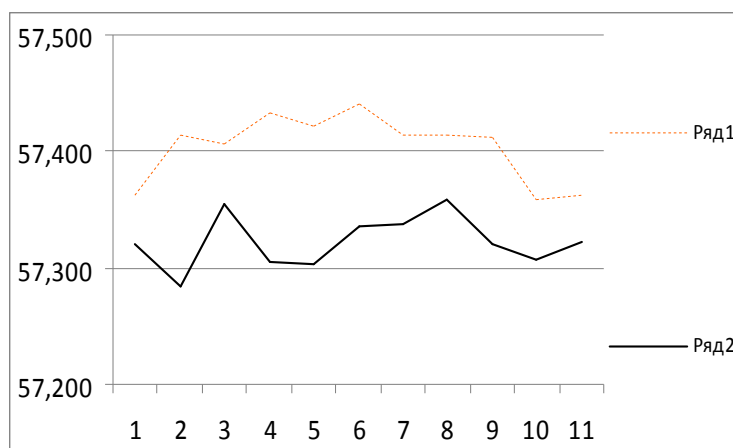
Встановлено, що у випадку, коли провадилося модифікування поверхні зерен із застосуванням хлоридів, на ріжучій поверхні кругів відбуваються певні збурення і тут формується ламаний хвильовий профіль, представлений, як приклад, на рис. 2 для умов моди-

фікування кубаніту хлоридом NaCl. Причому дія хлоридів є однаковою, як для алмазів, так і для кубоніту.

Надалі розглянемо ситуацію для зерен компактів з мікропорошків cBN. Тут ми також маємо сталий хвильовий профіль при шліфуванні швидкорізальної сталі Р6М5 шліфувальним кругом з зернами компакту 160/125 без модифікування, хоча можливо і не



**Рис. 2 – Утворення ламаного хвильового профілю круга в коловому напрямку (1–10 – розгортка круга) вздовж ріжучого шару при модифікованих кубонітових зернах хлоридом NaCl**



**Рис. 3 – Утворення пилкоподібного хвильового профілю круга в коловому напрямку (1-10 – розгортка круга) вздовж ріжучого шару при комбінації у ньому алмазних зерен і компактів мікропорошків cBN**

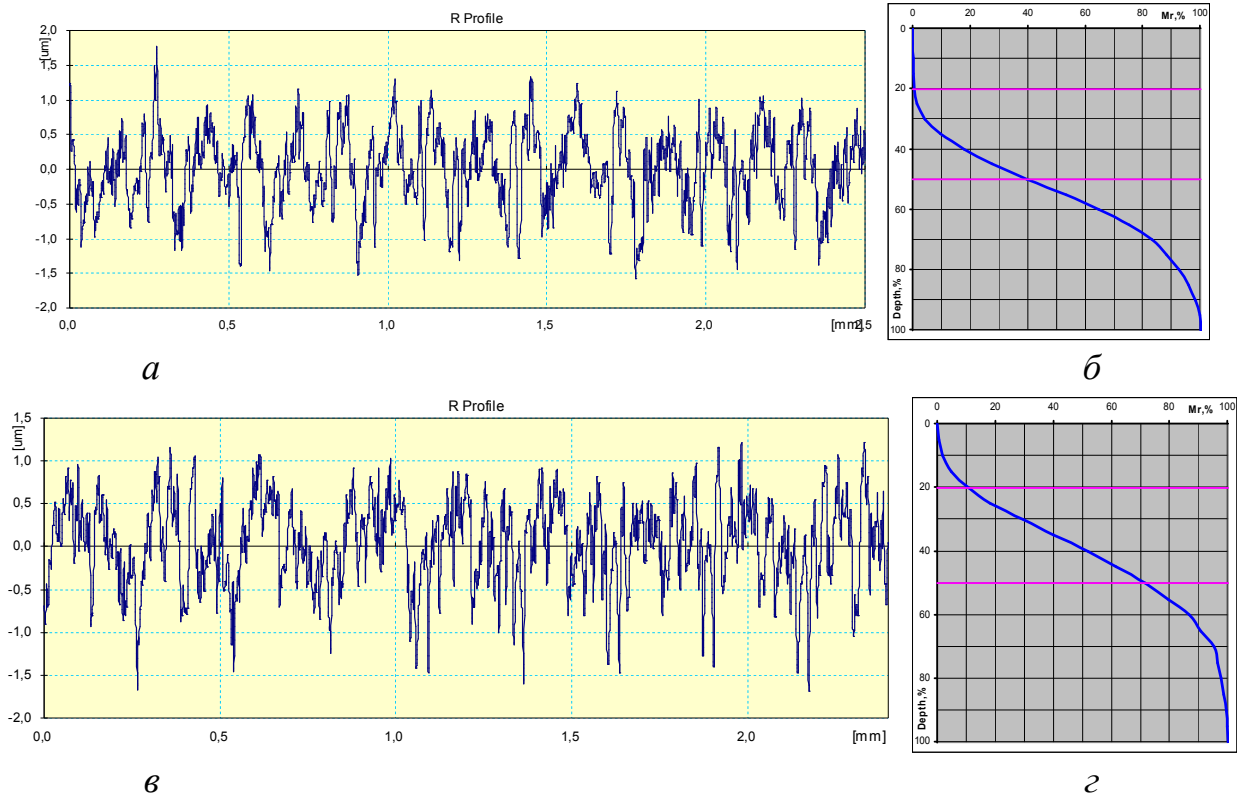
так чітко виражений як для кубоніту. І знову ж таки, у випадку, коли провадилося модифікування поверхні зерен із застосуванням хлоридів, на ріжучій поверхні відбуваються певні збурення і тут формується ламаний хвильовий профіль. Тобто бачимо, що дія хлоридів є однаковою, як для алмазів та кубоніту, так і для компактів. Можливо тут вносять свій вклад особливості утримання модифікованих хлоридами шліфувальних зерен, як алмазів, так і кубоніту.

Звернемо увагу, що формування ще більш ламаного («пилкоподібного») хвильового профілю ріжучої поверхні відбувається при комбінації в робочому шарі круга алмазів і компактів зі мікропорошків cBN (рис. 3).

Зазвичай, такі, вказані вище, зміни хвильового

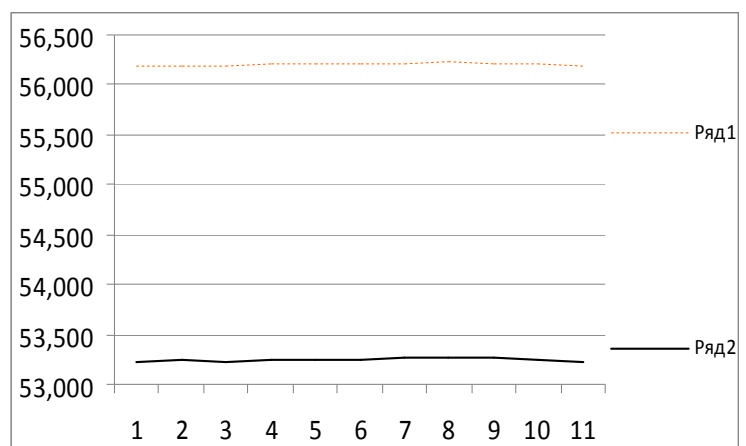
формозмінення не можуть не вплинути на формування мікронерівностей обробленої поверхні, і насамперед на опорні криві шорсткої поверхні, а саме, коли є ламаний профіль, то формується оброблена поверхня із зниженою несучою здатністю. Покажемо це на фо-

рмуванні шорсткої поверхні при шліфуванні кубонітовим кругом з КВ 125/100 із наявністю чіткого хвильового профілю (рис. 4, в, з) та із ламаним профілем, характерним для модифікації поверхні зерен хлоридами (рис. 4, а, б).



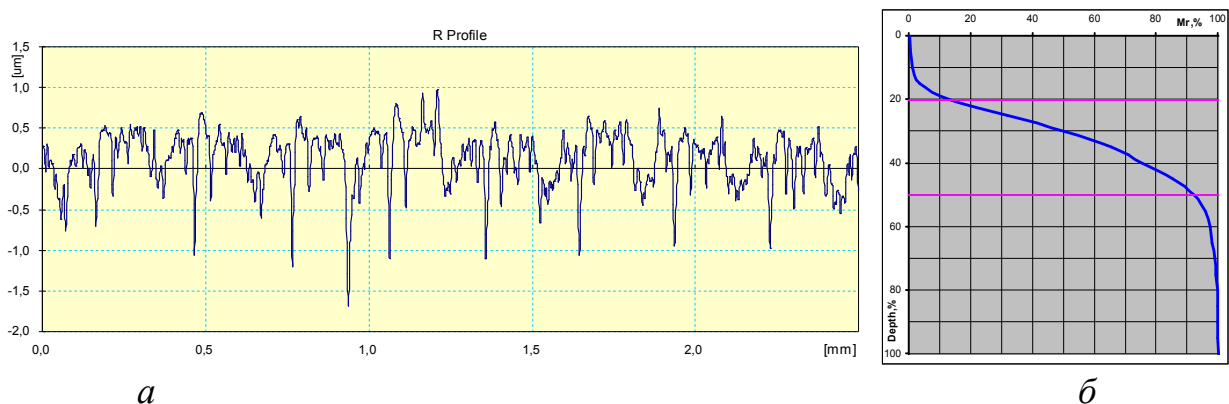
**Рис. 4 – Профілограми (а, в) і криві відносної опорної довжини профілю (б, г) поверхні, обробленої кругом з модифікацією поверхні зерен  $B_2O_3/NaCl$  (а, б) і кругом без модифікації поверхні зерен (в, г) при шліфуванні швидкорізальної сталі з продуктивністю  $200 \text{ мм}^3/\text{хв}$ .**

Тепер розглянемо ситуацію для зерен компактів з мікропорошків cBN при продуктивній обробці твердого сплаву марки Т15К6. Звернемо увагу на те, що для умов обробки такого важкооброблюваного твердого сплаву застосування компактів не є ефективним і знос кругів є занадто великим. Саме тут ми і маємо оту формозміну,



**Рис. 5 – Відсутність ознак формоутворення ріжучого шару круга в коловому напрямку (1-10 – розгортка круга) вздовж ріжучого шару при застосуванні в ньому компактів мікропорошків cBN**

або її відсутність, яку подано на рис. 5. Разом з тим, компакти забезпечують високі значення показника  $t50$  – 92,14%, що вказує на те, що тут шорстка поверхні формується із збільшеною несучою здатністю (рис. 6).



**Рис. 6 – Профілограма (а) і криві відносної опорної довжини профілю (б) поверхні, обробленої кругом з компактом 315/250 при шліфуванні твердого сплаву Т15К6 з продуктивністю 200 мм<sup>3</sup>/хв.**

Таким чином, встановлено, що коли на ріжучій поверхні круга є ламаний хвильовий профіль у коловому напрямку, то формується оброблена поверхня із зниженою несучою здатністю, а при відсутності формозміни формуються мікронерівності обробленої поверхні із підвищеною несучою здатністю.

### Література

1. Лавриненко, В.И. Формоизменение режущей поверхности круга как фактор процесса шлифования / В.И. Лавриненко // Сверхтв. мат. – 2000. – №5. – С. 45–52.
2. Якимов, А.В. Управление процессом шлифования / А.В. Якимов, А.Н. Паршаков, В.И. Свирцев, В.П. Ларшин. – К. : Техніка, 1983. – 184 с.
3. Дудукалов, Ю.В. Статистические характеристики макропрофиля рабочей поверхности абразивного инструмента / Ю.В. Дудукалов, А.Ф. Раб // Резание и инструмент в технологических системах : сб. науч. тр. – Харьков: ХПИ, 1990. – Вып. 44. – С. 34–41.
4. Чмир, М.Я. Взаимосвязь технологических показателей алмазно-электрохимического шлифования, характеристик оборудования и условий обработки / М.Я. Чмир, Н.А. Троицкий // Электрохимические и электрофизические методы обработки материалов : сб. науч. тр. – Тула: ТулПИ, 1990. – С. 80–92.

5. Лавріненко, В.І. Зернисті компакти на основі мікропорошків КНБ, отримані при низьких тисках, як функціональні елементи в структурі робочого шару алмазно-абразивного інструмента / В.І. Лавріненко, Б.В. Ситник, В.Г. Полторацький та ін. // Сверхтв. мат. – 2014. – №3. – С. 65–72.

6. Лавріненко, В.І. Визначення оксидів, призначених для модифікування поверхні алмазних зерен, за їх функціональними характеристиками / В.І. Лавріненко, В.Ю. Солод, І.С. Кашинський, В.Л. Доброскок // Надтверді мат. – 2020. – №6. – С. 66–73.

*Лавріненко В.І., Скрябін В.В., Ільницька Г.Д.,  
Петасюк Г.А., Ткач В.М. Інститут надтвердих матеріалів  
ім. В.М. Бакуля НАН України, Київ,  
Солод В.Ю., Танцура Т.О. Дніпровський державний  
технічний університет, Кам'янське, Україна*

## **ДО ВИБОРУ ЕФЕКТИВНОГО ЗВ'ЯЗУЮЧОГО ОДНОШАРОВОГО АЛМАЗНО-ГАЛЬВАНІЧНОГО ПОКРИТТЯ ДЛЯ ПРАВЛЯЧОГО ІНСТРУМЕНТУ**

При експлуатації алмазно-абразивного інструменту його зносостійкість визначається здатністю зв'язуючого опиратися зношуванню в процесі обробки. Нині, з-за появи на ринку високоміцних марок алмазів АС200–АС400 і застосування їх в алмазному правлячому інструменті виникла необхідність у виборі ефективного зв'язуючого одношарового гальванічного нікелевої зв'язки, яка не тільки повинна міцно утримувати алмази, але і опиратися активному гідроабразивному впливові при обробці. Визначення умов утворення таких одношарових гальванічних покриттів є важливим для забезпечення збільшення їх стійкості.

Однією з найбільш важливих характеристик електролітично осаджених металів є мікротвердість, яка залежить від умов електроосадження: складу і природи електроліту, температури і густини струму ( $i$ ). Наприклад, із збільшенням останньої мікротвердість блискучого нікелю зростає, але нарівні із цим формуються напруження, що призводять до деформації і спотворення розмірних параметрів на реальному інструменті, а для матового нікелю з гарячого ( $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) і холодного ( $T = 18\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) електролітів значення мікротвердості проходять

через максимум і відповідно дорівнюють 2,5 і 2,9 ГПа при  $i = 3,5 \text{ А/дм}^3$  [1]. Іншим ключовим фактором, що визначає працездатність і довговічність інструменту є міцність зчеплення алмазного шару, яка погіршується при збільшенні густини струму. Тут найкращі характеристики, за даними [1], спостерігаються у нікелю матового з гарячого електроліту при поетапному підвищенні катодної густини струму в процесі зарощування до  $i = 1,0 \text{ А/дм}^3$ .

Нами також були проведені дослідження, які в певній мірі підтвердили викладене вище. Так [2], розглянуті два варіанти нікелевого гальванічного зв'язуючого із застосуванням двох типів електролітів. Для першого зв'язуючого, умовно названого – „матовим”, за основу був взятий сульфаміно-кислий електроліт. Для другого зв'язуючого, умовно названого „блискучим”, за основу був взятий сірково-кислий електроліт з добавками для створення блиску. Елементні склади наведені в табл. 1. Аналіз даних табл. 1 дозволяє зробити висновок про те, що наявна відмінність у масових вмістах може спричинити відмінність і у властивостях таких зв'язуючих. Тому вивчалися такі важливі властивості як мікротвердість та теплопровідність. Як показано в роботі [2] матове покриття має меншу твердість, проте підвищену теплопровідність, а блискуче навпаки. Тобто, в залежності від умов застосування гальванічних нікелевих зв'язуючих можливо застосовувати відносно м'які, але високотеплопровідні зв'язуючі, або більш тверді, але менш теплопровідні.

**Таблиця 1 – Середній елементний склад гальванічних зв'язуючих**

Зв'язуюче	Масовий вміст елементів у зв'язуючому, %				
	C	O	Al	Fe	Ni
Матове	11,18–15,28	1,31–1,61	0,09	0,07–0,21	83,25–86,91
Блискуче	15,50–29,01	0,46–0,59	0,02	0,02–0,03	70,50–83,85

Нами також була звернена увага на впорядкованість структури цих різних зв'язуючих, оскільки спостерігається певна відмінна структурованість по напрямку протяжності (орієнтації) основної нікелевої фазової складової. Для оцінювання показників орієнтації та анізотропії зв'язуючих були застосовані показники Фур'є-аналізу зображень [2]. Порівняння двох методів нанесення гальванічного нікелевого зв'язуючого за оцінюванням показників орієнтації та анізотропії поверхневого шару підтвердило суттєву відмінність їх структури. Встановлено, що орієнтація поверхні „матового”

зв'язуючого складає  $87^\circ$ , а „блискучого” лише  $17^\circ$ , а відтак і теплопровідність матового є більшою. В цілому це означає, що рахунок технологічних методів можливо вплинути на структурну орієнтацію в робочому шарі такого одношарового алмазного інструменту, якправлячі ролики, і змінити властивості їх робочого шару.

Для досліджень алмазно-гальванічного покриття (АГП) на зносостійкість були застосовані алмази марки 160Т зернистістю 400/315. Зарощування алмазів провадилося у ванні із сірководокислим нікелем при густині струму  $0,5 \text{ А/дм}^3$ , рН електроліту 4,0–4,5. Після зарощування алмазів нікелем пластини напаявалися на циліндричні державки для проведення випробувань на зносостійкість. Випробування на зносостійкість провадилися на круглошліфувальному верстаті мод. 3Б151. Правці піддавався абразивний круг ПП 600х63х305 24А40СМ27К6. Режими правки: швидкість обертання круга – 35 м/с, подовжня подача – 1,0 м/хв., поперечна подача – 0,02 мм/хід (табл. 2) [3].

**Таблиця 2 – Відносні витрати алмазів в різних зв'язуючих АГП правленні**

Зв'язуюче АГП	Відносні витрати алмазів (мг/кг) в зразках АГП при поперечній подачі 0,02 мм/хід:
Матове	7,19–10,24
Блискуче	11,23–13,62

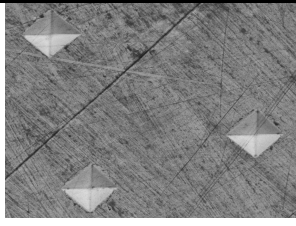
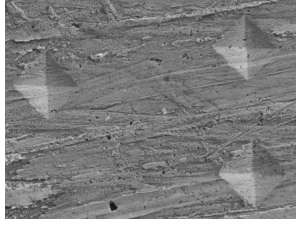
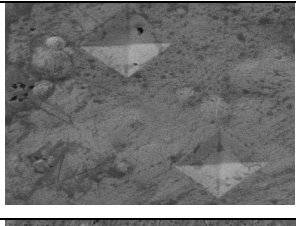
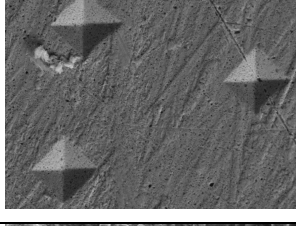
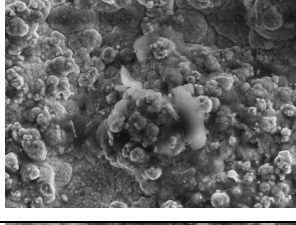
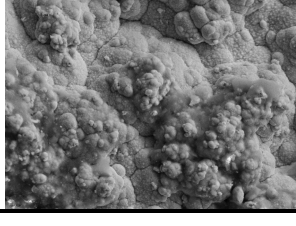
З табл. 2 видно, що застосування матового АГП дозволяє у середньому збільшити зносостійкість АГП у 1,43 рази.

На наступному етапі нами досліджувалися особливості структурної організації у одношаровому алмазно-гальванічному покритті із співосадженням мікропорошків абразиву. Для проведення роботи був вибраний сірководокислий нікелевий електроліт. Для отримання більш достовірних результатів застосовувалися алмази АС250Т вузького діапазону зернистості – 630/600. У якості співосадженого у нікелеву зв'язку абразиву був вибраний карбід кремнію зеленого зернистістю 5/0. Зарощування алмазів нікелем провадилося у ванні, в яку був доданий мікропорошок КЗ 5/0 у кількості 20 г/л, при густині струму  $1,0 \text{ А/дм}^2$ , рН електроліту 4,0–4,5.

Осадження мікропорошку відбувалося таким чином, що в шарі нікелю товщиною 2,0–2,5 мм висаджувалося до 800 шарів мікропорошку. Випробування на зносостійкість відбувалися за умовами, викладеними вище. Встановлено, що співосадження мікропорошку

карбіду кремнію зеленого дозволяє підвищити зносостійкість АГП у 1,15–1,75 рази. Одночасно було досліджено введення в покриття АГП мікропорошків карбіду бору тієї ж зернистості, що і карбіду кремнію. Вигляд і елементний склад АГП різних варіантів покриття наведені у табл. 3.

**Таблиця 3 – Вигляд, елементний склад та твердість АГП без та із введенням в його склад мікропорошків карбідів кремнію та бору**

Покриття	Вигляд	Вміст елементів (% за масою)					Твердість, ГПа
		C	O	Si	Fe	Ni	
Блискуче		3,66	0,20	0,01	0,00	96,13	4,41
Матове		5,85	1,67	0,35	0,58	91,54	3,16
Блискуче з 20 г/л SiC		4,68	0,45	0,17	0,07	94,63	3,80
Матове з 20 г/л SiC		7,43	1,49	3,72	0,39	86,94	3,05
Блискуче з 20 г/л B <sub>4</sub> C		13,57	2,83	0,22	5,64	77,29	–
Матове з 20 г/л B <sub>4</sub> C		26,90	4,10	0,23	4,96	63,61	–

Аналіз табл. 3 свідчить про наступне. Твердість «матового» АГП як без, так і з мікропорошком SiC, є меншою за аналогічні «блискучі» АГП. У «матовому» АГП більше кисню та карбону, і менше нікелю. Це в певній мірі збігається із даними табл. 1. Введення SiC збільшує вміст карбону в АГП і в обох випадках зменшує твердість. Характерним є те, що в «матовому» АГП на поверхні, навіть у відбитку виміру твердості, спостерігаються рівномірно розташовані частинки мікропорошку SiC (рис. 3, а), чого майже нема у відбитку «блискучого» АГП, тобто в «матовому» АГП розподіл мікропорошку в структурі є більш рівномірним, що і дозволяє збільшити його зносостійкість.

Звернемо також на особливості співосадження в АГП мікропорошку карбіду бору (див. табл. 3). Ці поверхні містять підвищений вміст карбону та кисню. Підвищена кількість кисню ймовірно викликана утворенням склоподібного  $B_2O_3$ , що, як наслідок, і обумовлює таку в них «рихлу» поверхню. А також підтягується залізо з підкладки, на яку наносилося нікелеве покриття. Все це вказує на те, що співосадження карбіду бору в АГП є недоцільним.

Таким чином, стосовно одношарового АГП для правлячого інструменту викладені особливості отримання його структурної організації, яка розглядалася в двох напрямках: як орієнтація та анізотропія в структурі шару покриття і як введення в покриття поряд з крупними алмазами складову дрібнодисперсного наповнювача, які різняться між собою на 2 порядки. Показано, що за рахунок технологічних методів можливо вплинути на структурну організацію в робочому шарі такого одношарового алмазного інструменту і спрямовано змінити його властивості.

## Література

1. Сверхтвёрдые материалы. Получение и применение. В 6 т. / под общ. ред. Н.В. Новикова // Т.3. Композиционные инструментальные материалы. – К. : ИСМ им. В.М. Бакуля НАН Украины, 2005. – 280 с.

2. Лавріненко, В.І. Особливості формування структурованості в гальванічному зв'язуючому алмазного правлячого інструменту / В.І. Лавріненко, І.П. Фесенко, А.Г. Лубнін та ін. // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения : сб. науч. тр. – К.: ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2011. – Вып. 14. – С. 524–529.

3. Лавріненко, В.І. Особливості впливу зернистості алмазних зерен на характеристики алмазно-гальванічного покриття стосовноправлячого інструменту / В.І. Лавріненко, Г.А. Петасюк, А.Г. Лубнін // *Якість, стандартизація, контроль: теорія і практика* : мат. 20-й Міжнарод. наук.-практ. конф., 07–11 вересня 2020 р., м. Одеса. – К. : АТМ України, 2020. – С. 88–91.

*Лещук І.В., Рябченко С.В., Сільченко Я.Л.*  
Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля  
НАН України, Київ, Україна

## **ВИКОРИСТАННЯ СПЕЦІАЛЬНИХ ШЛІФУВАЛЬНИХ АЛМАЗНИХ ТА КНБ КРУГІВ НА ВЕРСТАТАХ З ЧПК**

Шліфування твердих та зносостійких матеріалів є актуальною проблемою сучасного машинобудування.

По сукупності робочих характеристик – стійкістю, продуктивності обробки, можливості забезпечення даних параметрів макро та мікрогеометрії обробленої поверхні – найкращим типом зв'язці для синтетичних алмазів та КНБ є гібридні зв'язки, які поєднують якість різних матеріалів (метал – органіка, органіка – кераміка).

Приведемо де кілька прикладів використання шліфувальних кругів з алмазу та КНБ при обробці на верстатах з ЧПК.

Зокрема, використання алмазних шліфувальних кругів форми 1A1 та 1V1 при обробці фрез з твердих сплавів. Дослідження працездатності алмазних кругів виконувалось при шліфуванні робочий частин фрези в порівнянні з обробкою шліфувальними кругами фірми «Gabus» (Швейцарія). Круги встановлювались на шліфувально-заточному верстаті з ЧПК фірми «JUNGNER» моделі US 600 CNC. Деталі, яка обробляється, кінцеві фрези діаметром 16 мм. Матеріал фрез – твердий сплав H10F. Охолодження – концентрат MOTC фірми «BLASER» (Grindex SC 892-01).

При шліфуванні задніх поверхонь, передніх поверхонь та спинок фрези використовувались алмазні круги форми 1A1 розміром 125×12×5×32 зернистістю АС6 63/50 на зв'язці ВК3 100% концентрацією. Режими обробки: обертання шліфувального круга – 4200 об/хв., глибина шліфування – 0,5 мм, подача – 50–60 мм/хв., кількість проходів – 3. Провка круга не використовувалась.

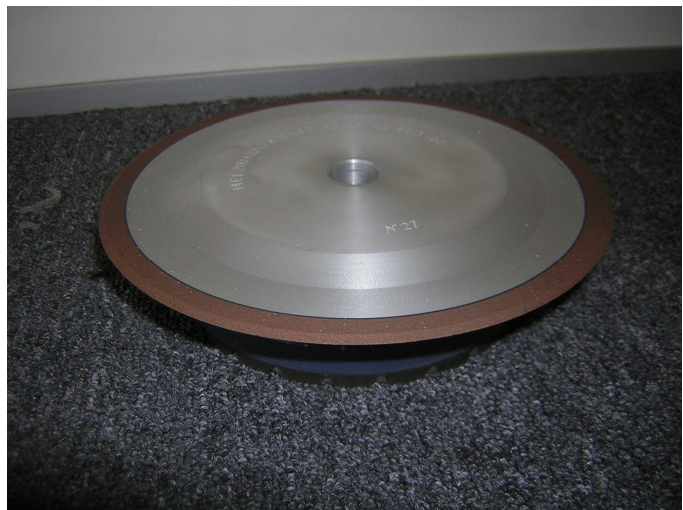
При шліфуванні стружкових канавок фрез використовувались алмазні круги форми 1V1 розміром  $125 \times 12 \times 5 \times 32 \times 30^\circ$  зернистістю АС6 63/50 на зв'язці ВКЗ 100% концентрацією (рис. 1). Режими обробки: обертання шліфувального круга – 3900 об/хв., глибина шліфування – 0,775 мм, подача – 50–60 мм/хв., кількість проходів – 8. Правка круга не використовувалась.

Результати випробувань показали, що розроблені алмазні круги на гібридній зв'язці ВКЗ дозволяють забезпечити хорошу працездатність кругів при шліфуванні інструменту з твердого сплаву на верстатах з ЧПК. При обробці фрез з твердого сплаву знос зовнішнього діаметру круга складає 0,02 мм, що по стійкості дорівнює зносу Швейцарських кругів. Шорсткість обробленої поверхні  $Ra\ 0,2$ .

Другим прикладом є використання високоточних спеціальних кругів форми 14E1 ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН, Москва, Россия  $200 \times 6 \times 20 \times 3 \times 18^\circ$  на гібридній зв'язці ВКЗ (рис. 2).



**Рис. 1 – Алмазні шліфувальні круги форми 1V1 на гібридній зв'язці ВКЗ**



**Рис. 2 – Шліфувальні круги форми 14E1 на гібридній зв'язці ВКЗ**

Гібридна зв'язка ВКЗ була розроблена для праці в закритій зоні при шліфуванні канавок спеціального інструменту на шліфувальних верстатах з ЧПК. Зв'язка ВКЗ поєднує якість металевої та полімерної зв'язки. В якості абразивного матеріалу використовується суміш абразивів – бурштинового кубічного нітриду бору KB 125/100 (50%) та золь-гелівого корунду SG92 (50%).

Нами виконувалось шліфування спеціальних виробів з титанового сплаву ВТ6. Шліфувалась канавка шириною 3 мм профілю кутотом  $18^\circ$ . Охолодження – концентрат СОТС фірми «BLASER» (Grindex SC 892-01).

Результати випробувань показали, що розроблені круги форми 14E1 з суміші абразивів КНБ та золь-геливого корунду на гібридній зв'язці ВКЗ дозволяють забезпечити хорошу працездатність кругів при шліфуванні канавок кутової форми на верстатах з ЧПК. Розроблені круги використовуються в виробництві при шліфуванні канавок в титанових виробках на верстатах з ЧПК фірми «Gemini» (Швейцарія).

*Майстренко А.Л., Олійник Н.О., Петасюк Г.А.,  
Виноградова О.П., Ільницька Г.Д., Васильчук О.С.,  
Базалій Г.А. Інститут надтведих матеріалів  
ім. В.Н. Бакуля НАН України, Київ, Україна*

## **ВПЛИВ АБРАЗИВНОЇ СКЛАДОВОЇ КАМ НА ФОРМУВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ КРУПНОСТІ ШЛАМУ, ЯКИЙ ОТРИМУЮТЬ ПРИ ОБРОБЦІ ГІРСЬКОЇ ПОРОДИ**

Вдосконалення та створення нового породоруйнівного інструменту потребує вивчення механізмів зношування КАМ на металевих зв'язках при обробці гірських порід.

Дослідження характеристик крупності, складу шламу, який утворюється в процесі обробки може дати необхідну інформацію.

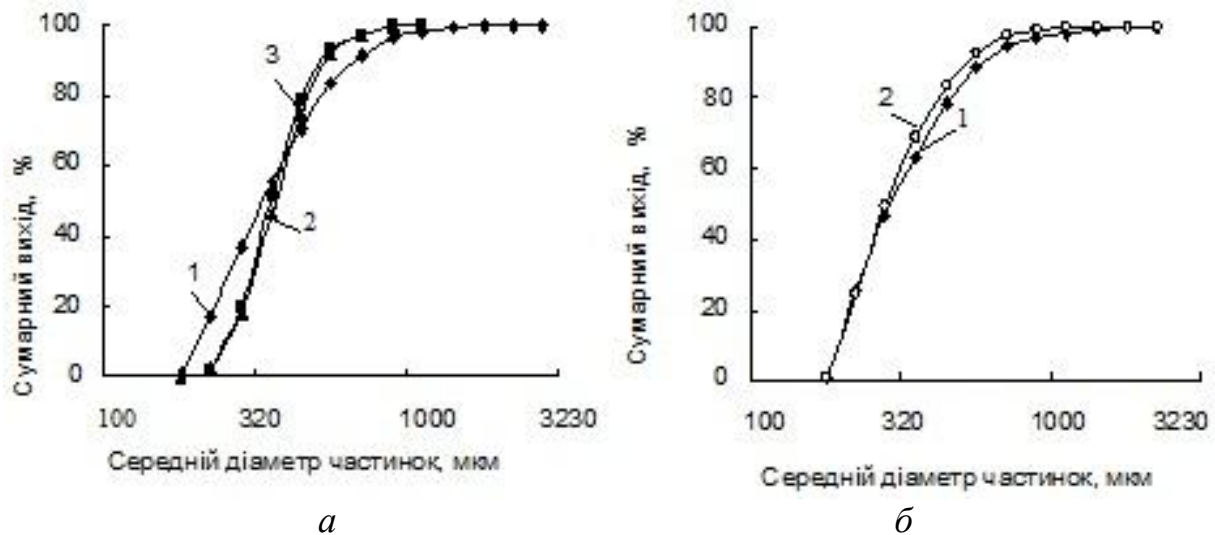
Мета роботи – дослідження впливу характеристик абразивної складової КАМ на зміну параметрів характеристики крупності шламу, який утворюється при обробці гірської породи

Досліджували характеристики крупності шламу, який утворюється при обробці блоку пісковика Торезського родовища експериментальними елементами з КАМ (матричний матеріал Ni (94%)-Sn (6%)) з абразивною складовою у вигляді порошку алмазу марки АС300 зернистості 630/500, концентрацією у матричному матеріалі 100, 50, 25 ум.% за об'ємом; – порошку алмазу марки АС200 зернистості 400/315 концентрацією у матричному матеріалі 50, 25 ум.% за об'ємом. Елементи виготовляли методом інтенсивного резистивного електроспікання під тиском 180–240 МПа.

Зразки випробували на експериментальному стенді при обробці циліндричного блоку пісковика, що містить кварц ( $\text{SiO}_2$  в кількості

75–85% за об'ємом; доломіт ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ); пірит ( $\text{FeS}_2$ ), з'єднані глинистим цементом.

Визначення розподілення за розмірами частинок проводили з використанням даних з морфометричних характеристик за допомогою приладу DiaInspect, OSM фірми VOLLSTADT DIMANT GmbH та наступного аналітичного їх опрацювання (рис. 1, табл. 1).



**Рис. 1 – Характеристика крупності шламу, отриманого в результаті випробувань елементів з КАМ з різним вмістом порошку алмазу: а – АС 300 зернистістю 630/500, концентрація алмазного порошку: 1 – 100%; 2 – 50%, 3 – 25 ум. % (за об'ємом); б – АС 200 зернистістю 400/315, концентрація алмазного порошку: 1 – 50%, 2 – 25 ум. % (за об'ємом)**

**Таблиця 1 – Результати апроксимації характеристик крупності шламу**

Порошок алмазу, що міститься у експериментальних елементах	Концентрація порошку, ум. %	Коефіцієнти рівняння $y = ax + b$		Інтервал середнього діаметра частинок, мкм	Достовірність апроксимації, $R^2$	Фактичний сумарний Вихід частинок шламу (%) в інтервалі 180–450 мкм
		$a$	$b$			
АС300 630/500	100	0,2579	- 41,01	180–450	0,9714	70,22
	50	0,3145	- 63,57		0,9745	78,97
	25	0,2929	- 59,26		0,9785	74,45
АС200 400/315	50	0,2775	- 40,37		0,9384	78,30
	25	0,3036	- 45,28		0,9454	83,87

### **Висновки:**

Встановлено, що характеристика крупності шламу, отриманого при випробуваннях експериментальних елементів з порошком алмазу АС300 630/500 з вмістом порошку 100% (за об'ємом) знаходиться в області більш дрібних розмірів, ніж при вмісті порошку алмаза 50 и 25 % (за об'ємом).

Характеристики крупності шламу, отриманого при випробуваннях елементів з порошком алмазу с АС200 400/315 з вмістом порошку 50 и 25 % (за об'ємом) майже співпадають, однак знаходяться в області більш дрібних розмірів, ніж характеристики крупності шламу, отриманого випробуваннях елементів з порошком алмазу АС300 630/500.

Характеристики крупності шламу в інтервалі середніх діаметрів частинок 180–450 мкм може бути описана рівнянням  $y = a \cdot x + b$  з достовірністю апроксимації більше за 0,9384. Результати, отримані експериментально (див. рис. 1, 2), підтверджуються результатами апроксимації характеристик крупності: коефіцієнт  $a$  рівняння  $y = a \cdot x + b$ , збільшується у характеристик шламу який утворюється в результаті обробки гірської породи елементами при зниженні вмісту порошку алмазу від 100 до 25% (за об'ємом). Результати розрахунків узгоджуються з експериментально встановленим сумарним виходом частинок шламу 70,22–83,87%.

*Марініна Г.М., Степаненко С.М. ДП «Івченко-Прогрес»,  
Абакумова О.В., Єпищенков В.В. НУ  
«Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна*

## **ЗАСТОСУВАННЯ SWOT-АНАЛІЗУ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ДІЛОВОГО СЕРЕДОВИЩА ЗГІДНО СТАНДАРТУ EN 9100:2018**

Стандарт EN 9100:2018 (національний еквівалент ДСТУ EN 9100:2018) розроблений Міжнародною групою з якості в аерокосмічній галузі (IAQG) на основі стандарту ISO 9001:2015 для сертифікації систем управління якістю (СУЯ) підприємств і організацій в авіаційній, космічній та оборонній галузях, що займаються проектуванням, розробкою та/або виробництвом і ремонтом авіаційної техніки (АТ).

Для визначення переліку чинників, що роблять найбільший вплив на діяльність підприємства в умовах існуючого ділового середовища (контексту) може бути застосований інструмент під назвою SWOT-аналіз.

Абревіатура SWOT відображає структуру проведеного аналізу, що дозволяє виявити і оцінити сильні (Strengths, S) і слабкі (Weaknesses, W) сторони, можливості (Opportunities, O) і загрози (Threats, T), що стосуються досліджуваного об'єкта, наприклад, ділового середовища підприємства. Результати SWOT-аналізу прийнято представляти у вигляді чотирьохсекторної матриці. У цій матриці аналізовані параметри контексту, які є сильною стороною організації (S) і надають нові можливості (O), відносяться до групи позитивно впливаючих факторів - сектор I, а параметри, які є слабкою стороною організації (W) і що таять загрозу (T), відносяться до групи негативно впливаючих факторів - сектор III. У два інші сектори потрапляють чинники, які не настільки радикально впливають на перспективи розвитку підприємства. Структура матриці SWOT-аналізу показана на рис. 1.

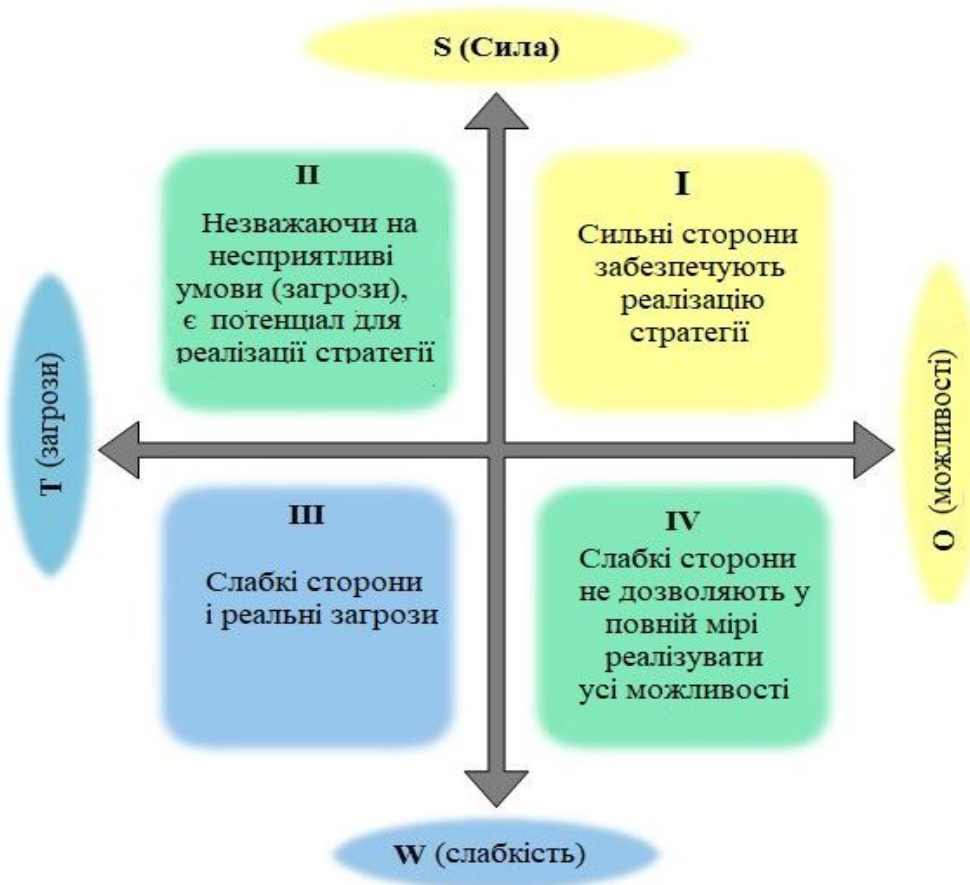


Рис. 1 – Матриця SWOT-аналізу

Розглядається приклад моніторингу поточного стану внутрішнього середовища підприємства за результатами аналізу таких взаємно впливаючих факторів як: дотримання планів передачі конструкторської документації в цехи (СП); ритмічність і своєчасність коопераційних зв'язків (Ритм); створення нових зразків АТ (Нов); модернізація раніше розроблених зразків АТ (Мод); забезпечення персоналом (Перс); визначення нових тематичних напрямків (ТН); узгодження конструкторської документації (КД); участь в льотних випробуваннях (ЛІ); підвищення кваліфікації (Кв); стимулювання і мотивація співробітників (СМС); комфортність ділового клімату (КДК); оцінка компетентності персоналу (Ком); освоєння нових технологій (НТех); застосування міжнародного та національного досвіду щодо поліпшення процесів проектування (ОП); придбання нового обладнання (Об). Схема взаємовпливу розглянутих факторів в формі спрямованого графа наведена на рис. 2.

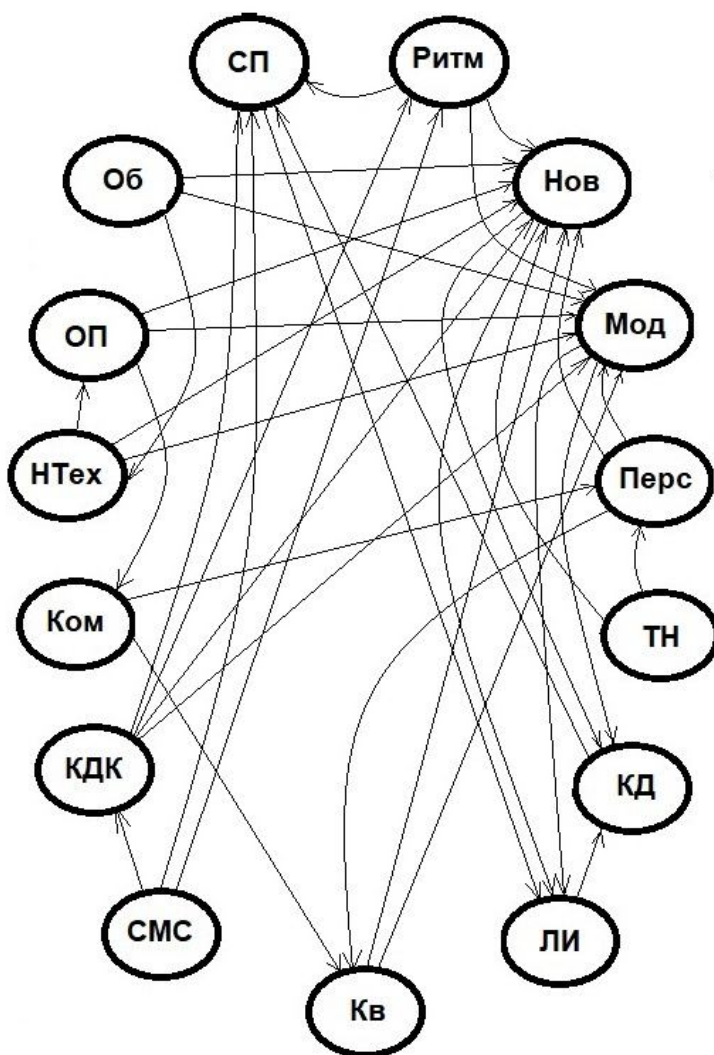


Рис. 2 – Взаємний вплив факторів

Сильні і слабкі сторони факторів внутрішнього середовища визначаються з урахування їх взаємного впливу. Для цього по числу виходів з кожної вершини графа визначається вагомість «джерельного» фактора –  $A$ , що впливає на «приймаючі» чинники, посилюючи або послаблюючи їх. Ваговий коефіцієнт  $D$  кожного з факторів визначається за формулою:

$$D = (A/m) \times 100\% , \quad (1)$$

де  $m$  – максимальне число вихідних внутрішнього середовища зв'язків в графі.

Далі проводиться оцінка впливу поточного стану кожного фактора  $T$  за наступною шкалою: негативний (-3), погіршуючий (-2), задовільний (0), добрий (2), відмінний (3). Остаточний показник ступеня впливу кожного фактора визначається за формулою:

$$F = (D \times T) + 30 \times (B - Y) , \quad (2)$$

де 30 – множник, визначений експертним шляхом;  $B$  – кількість розглянутих можливостей, створюваних фактором;  $Y$  – кількість загроз.

Результати аналізу розглянутих факторів як сильних і слабких сторін внутрішнього середовища підприємства, виконаного по описаній вище методиці, наведені в табл. 1, де відображені кількості виходів (Вих.) і входів (Вх.) для кожного фактора. Ступінь впливу факторів  $D$  нормована по фактору з найбільшою кількістю виходів  $m = 4$ . Наведені результати оцінки поточного стану кожного фактора  $T$ , різниця між кількістю розглянутих можливостей, створюваних кожним фактором і кількістю загроз ( $B-Y$ ), розраховані показники ступеня впливу кожного фактора  $F$  і рейтинг факторів  $R$  по співвідношенню «сильні – слабкі сторони». У таблиці 1 наведені дані для шести крайніх рейтингових факторів.

**Таблиця 1 – Результати аналізу сильних і слабких сторін**

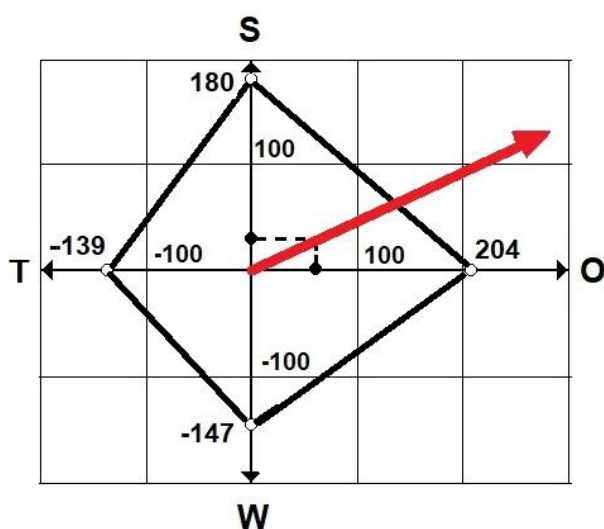
Фактор	Зв'язки		$D, \%$	$T$	$B-Y$	$F$	$R$
	вих.	вх.					
КДК	4	1	100	2	0	200	1
Об	3	0	75		1	180	2
ТН	2		50		2	160	3
СП	1	4	25	-2	-3	-110	13
Ритм	3	2	75		0	-150	14
СМС		0			1	-180	15

Аналізуючи можливо-сті і загрози, що розглядаються в зв'язку з контролю-ваними факторами внутрішнього середовища, оцінюючи їхню соціальну значимість ( $Z$ ) і ймовірність настання подій ( $P$ ), виділяються групи з трьох рейтингових можливостей, а також трьох загроз. У таблиці 2 наведені дані по цим, найбільш значущим можливостям і загрозам, розраховано коефіцієнт потенційного впливу КПВ і вказано середні значення для цих груп можливостей і загроз. У табл. 2 можливості умовно позначені В1–В5, а загрози – У1–У6.

**Таблиця 2 – Оцінка найбільш значущих можливостей і загроз**

Фактор	В/У	Z	P, %	КПВ	Середні значення	Фактор	В/У	Z	P, %	КПВ	Середні значення
Можливості						Загрози					
Нов	В1	3	75	225	225	Нов	У1	-3	50	-150	-117
	В2						У2	-2		-100	
Мод	В3				2	100	200	187,5		Перс	
	В4	150	У4	-3							
КДК	В5	2	100	200	204	СМС	У5	-2	75	-150	-139
							У6	-3	50		

Відклавши у SWOT-матриці по осі WS середнє значення сильних ( $F^+ = 180$ ) і слабких сторін ( $F^- = -147$ ), отримаємо вертикальну координату вектора спрямованості розвитку. Відклавши по осі TO середнє значення можливостей (204) і загроз (-139), отримаємо горизонтальну координату вектора спрямованості розвитку. Результат побудови показаний на рис. 3. Вектор спрямованості розвитку показує, що наявні сильні сторони внутрішнього середовища підприємства дозволяють реалізувати наявні можливості.



**Рис. 3 – Вектор спрямованості розвитку можливості**

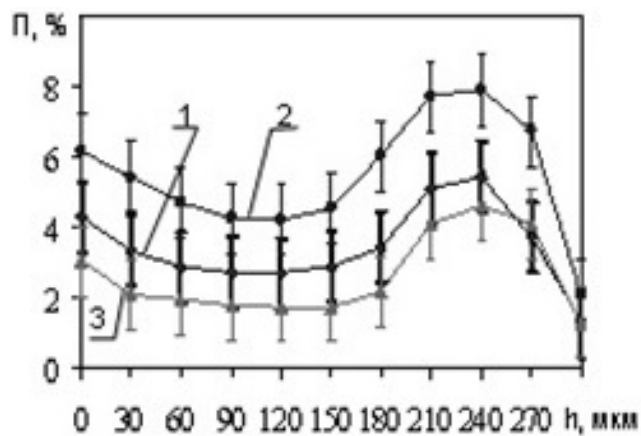
## **КАЧЕСТВО ПОКРЫТИЙ ПОСЛЕ МАГНИТНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО УПРОЧНЕНИЯ И ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ**

Актуальной проблемой в машиностроительном и ремонтном производствах является улучшение качества, повышение надежности и долговечности быстроизнашивающихся деталей машин и механизмов. Эффективными способами упрочнения и восстановления деталей машин являются технологии, основанные на использовании концентрированных потоков энергии в пространстве и во времени. К их числу относится магнитно-электрическое упрочнение (МЭУ) композиционными ферромагнитными порошками (ФМП), обладающее такими достоинствами, как отсутствие специальной предварительной подготовки поверхности детали, незначительная зона термического влияния и высокая прочность сцепления покрытия с основным материалом детали. Однако основным недостатком МЭУ является неравномерность и неоднородность покрытия по толщине, что не позволяет использовать МЭУ для восстановления геометрических размеров поверхностей. К дефектам покрытий после МЭУ относятся их разнотолщинность и наличие пор [1]. При МЭУ несовпадение импульсов напряжений электромагнита и источника технологического тока, а также погрешность дозирования подачи ФМП приводят к нарушению устойчивости процесса нанесения покрытий, образованию пористости покрытий и снижению их сплошности.

Нанесение покрытий производили на установке УНП-1 по однополюсной схеме. В качестве источника технологического тока использовали сварочный инвертор Invertec V270-T, у которого микропроцессорная система управления позволяет плавно настраивать сварочный ток в широком диапазоне 5–270 А. Исследования проводили на образцах в виде колец ( $D \times d \times h$ )  $40 \times 16 \times 12$  из стали 45 ГОСТ 1050-88, микроструктура которой в исходном состоянии – смесь феррита и сорбитообразного перлита.

Открытую пористость на поверхности покрытий определяли на нетравленных микрошлифах с использованием автоматического анализатора изображения «Mini MagiScan» фирмы «Jouyce Loebel» с компьютерной обработкой данных по программе количественного ана-

лиза. Определение пористости покрытий и размера пор состояло из следующих этапов: калибровка и фиксация изображения; сегментирование; выбор необходимых измерений. Размеры микротрещин оценивали с помощью микроскопа поэтапно: вначале измеряли видимую под окуляром ширину микротрещины, затем определяли ее длину посредством перемещения стола с образцом вдоль направления трещин относительно перекрестия окуляра микроскопа.

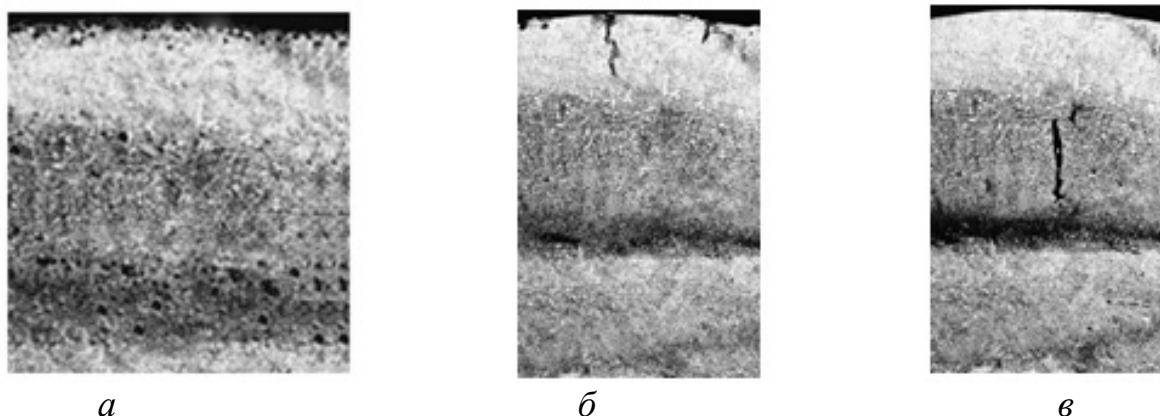


**Рис. 1 – Распределение пористости по глубине покрытий из порошков: 1 – Fe-2%V; 2 – Fe-Ti; 3 – ФБХ-6-2**

Установлено (рис. 1), что наибольшая пористость находится на границе покрытия и основы. Это объясняется тем, что в процессе нанесения покрытий происходит захлопывание газа каплями расплава порошка на поверхности детали и усадка при переходе жидкой фазы в твердую [2].

Форма пор шаровидная размером 10–20 мкм (рис. 2, а). Повышенная пористость наблюдается в поверхностных слоях покрытий.

При этом открытая пористость образуется по границам застывших капель расплава порошка в виде продолговатых округлых пор. Поры размером 20–30 мкм распределены по поверхности покрытия неравномерно. Открытая пористость покрытий составляет 4–12%, что положительно сказывается на износостойкости при трении с ограниченной смазкой, так как поры являются аккумуляторами смазочного материала.

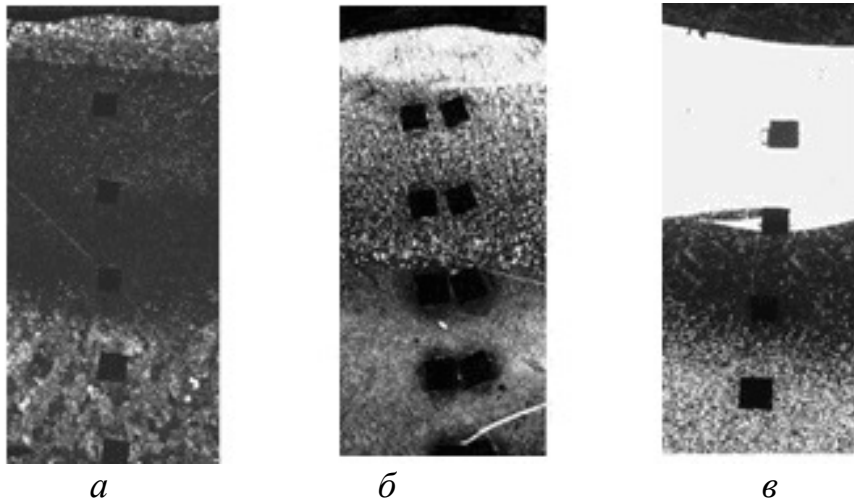


**Рис. 2 – Фотографии микроструктуры покрытий из Fe-2%Ti (×200): а – с порами внутри покрытия; б – с трещинами на поверхности; в – с трещинами в покрытии**

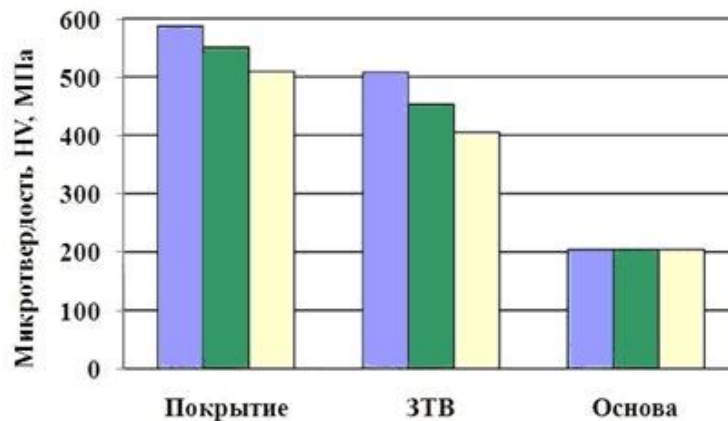
Трещинообразование при МЭУ (рис. 2, б, в) является результатом возникновения остаточных напряжений при высоком градиенте температур при нагреве и охлаждении покрытий, а также фазовых превращений, сопровождающихся искажением кристаллической решетки.

Для устранения указанных дефектов были проведены исследования возможности обработки покрытий лазером. Последующая лазерная обработка покрытий на образцах производилась на CO<sub>2</sub>-лазере модели «Комета-2» мощностью 1 кВт. Микроструктура покрытий изучались методом оптической металлографии поперечных шлифов с использованием светового микроскопа Mef-3 фирмы «Reichert-Jung» и цифрового фотоаппарата «HP photosmart 715 digital camera». Микротвердость измеряли на приборе ПМТ-3М по стандартной методике при величине статической нагрузки на индентор  $P \sim 0,49$  Н (50 г). Толщину покрытий определяли по распределению микротвердости в поперечном сечении образцов при помощи окулярной вставки с увеличением в 200 раз. Разнотолщинность покрытий определялась по разности максимальной и минимальной местных толщин покрытий образца.

Микроструктурный анализ показал, что все покрытия характеризуются мелкодендритным строением. Основу покрытия из ФМП Fe-Ti составляет твердый раствор титана в  $\alpha$ -железе (рис. 3, а), а также содержится незначительное количество остаточного аустенита, интерметаллидов (FeTi, Fe<sub>2</sub>Ti), карбидов титана (TiC) и железа (FeC) [3]. Основу покрытия из ФМП Fe-5%V (рис. 3, б) составляет твердый раствор ванадия в  $\alpha$ -железе, остаточный аустенит, карбиды ванадия (V<sub>2</sub>C, V<sub>4</sub>C<sub>2,67</sub>) и железа (FeC, FeC<sub>8</sub>). Диффузионная зона имеет структуру дислокационного мартенсита. Зона термического влияния (ЗТВ) представляет собой область неполной закалки, структура которой представляет феррит и отдельные участки перлита, превратившегося в троосто-мартенсит. В покрытии из ФБХ-6-2 (рис. 3, в) поверхностные слои состоят из частиц очень тонкого игольчатого строения, которые вытянуты в сторону основного металла. Основу покрытия составляет твердый раствор хрома в  $\alpha$ -железе, остаточный аустенит, а также карбиды железа (Fe<sub>2</sub>C), бориды (FeB, CrB<sub>2</sub>, Cr<sub>5</sub>B<sub>3</sub>) и ферроборида (Cr<sub>1,65</sub>Fe<sub>0,35</sub>B<sub>0,96</sub>). Наибольшее значение средней микротвердости имеют покрытия ФМП ФБХ-6-2 (587 HV), что в 2,9 раза больше по сравнению с материалом основы (рис. 4).



**Рис. 3 – Фотографии микроструктуры ( $\times 50$ ) покрытий после МЭУ и лазерной обработки: *а* – Fe-Ti; *б* – Fe-5%V; *в* – ФБХ-6-2**



**Рис. 4 – Диаграмма результатов исследований на микротвердости**  
 Столбцы: 1 – ФБХ-6-2; 2 – Fe-5%V; 3 – Fe-Ti

Экспериментально установлено, что лазерная обработка покрытий, полученных МЭУ, позволяет повысить качество поверхностного слоя за счет снижения их объемной пористости до 3-х раз и средней разнотолщинности до 1,2 раза.

### Литература

1. Акулович, Л.М. Магнитно-электрическое упрочнение поверхностей деталей сельскохозяйственной техники / Л.М. Акулович, А.В. Миранович. – Мн. : БГАТУ, 2016. – 236 с.
2. Обработка и упрочнение поверхностей при изготовлении и восстановлении деталей / под общ. ред. М.Л. Хейфеца и С.А. Клименко. – Мн.: Беларуская навука. 2013. – 463 с.
3. Акулович, Л.М. Характеристика покрытий после магнитно-электрического упрочнения и лазерной обработки / Л.М. Акулович, О.Г. Девойно, А.В. Миранович, В.Г. Мисько // Инновационные тех-

нологии в машиностроении [Электронный ресурс] : электронный сб. мат. Международ. науч.-техн. конф., посвященной 50-летию Полоцкого государственного университета, Новополоцк, 19–20 апр. 2018 г. / под. ред. В.К. Шелега и Н.Н. Попок. – Новополоцк, 2018. – С. 156–159.

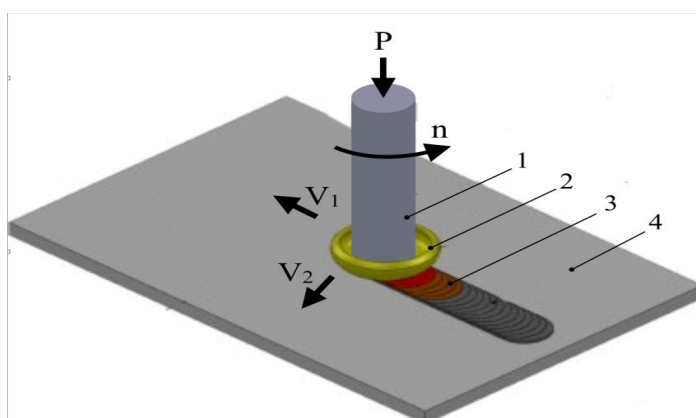
*Михеев Р.С.* МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
*Колмаков А.Г., Калашиников И.Е., Кобелева Л.И.,*  
*Быков П.А.* Институт металлургии и материаловедения  
им. А.А. Байкова РАН, Москва, Россия  
*Клименко С.А., Копейкина М.Ю.* Институт сверхтвердых  
материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины, Киев, Украина,  
*Хейфец М.Л.* Институт прикладной физики  
НАН Беларуси, Минск, Беларусь

## **ТЕХНОЛОГИЯ ФРИКЦИОННОЙ НАПЛАВКИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ СТАЛЕАЛЮМИНИЕВЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ГРАДИЕНТНЫХ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИЦИЙ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ И НА ТРАНСПОРТЕ**

В последние годы все большее распространение получают биметаллические конструкции и узлы системы железо-алюминий, представляющие собой сталеалюминиевые функционально-градиентные слоистые композиции (ФГСК). Этому способствует быстрое развитие транспорта: авиа-, автомобиле- и судостроения, а также других отраслей промышленности, где преимущественно применяются подобные детали и узлы [1].

К настоящему времени для получения металлической (диффузионной) связи между железом и алюминием, а также его сплавами применяют различные методы алитирования, т. е. покрытия железа слоем алюминия. Одним из современных наиболее предпочтительных подходов является применение простой и экономичной технологии фрикционной наплавки или наплавки трением [2–4]. Подобная технология сравнима с процессом сварки трением с перемешиванием, в которой вращающийся стержень, изготовленный из алюминия или его сплавов, является расходуемым материалом, обеспечивающим формирование рабочего функционального слоя на пове-

рхности стальной подложки (рис.1). Нагрев зоны соединения происходит за счет работы против сил трения, возникающих на свариваемых поверхностях при физическом контакте вращающегося стержня с подложкой, прижатых друг к другу нормальным усилием. Важно отметить, что максимальная температура нагрева зоны соединения, достигаемая в процессе фрикционной наплавки, не превышает температуру плавления материала вращающегося стержня [4]. Таким образом, на торце контактирующей с подложкой части стержня формируется вязкопластичный граничный слой, который образует наплавленное покрытие при поступательном движении стержня и подложки относительно друг друга. Вследствие относительно низких температур нагрева процесс фрикционной наплавки в сравнении с другими методами изготовления сталеалюминиевых ФГСК характеризуется узкой зоной термического влияния и ограниченным диффузионным взаимодействием на границе раздела подложка-покрытие, что позволяет предотвратить интенсивный рост хрупких интерметаллидных соединений разного стехиометрического состава системы Fe-Al, снижающих уровень адгезионной прочности биметаллических материалов. Поэтому целью настоящей работы явилось исследование возможности и разработка технологии процесса фрикционной наплавки для получения сталеалюминиевых функционально-градиентных слоистых композиций, применяемых в промышленности и на транспорте.



**Рис. 1 – Схема процесса фрикционной наплавки:**

1 – стержень из КМ; 2 – вязкопластичный граничный слой; 3 – наплавленный слой; 4 – подложка ( $P$  – давление;  $n$  – частота вращения стержня;  $V_1$  и  $V_2$  – продольная и поперечная линейные скорости перемещения стержня)

В качестве подложки для нанесения покрытий применяли пластины размером 100x200x3 мм, изготовленные из качественной низкоуглеродистой стали 20 (0,17-0,24 масс.% С; 0,17-0,37 масс.% Si;

0,35–0,65 масс.% Mn;  $\leq 0,25$  масс.% Cr; Fe – остальное по ГОСТ 1050). Наплавочным материалом служил алюминий марки А5 (0,20–0,35 масс.% Fe; 0,1–0,25 масс.% Si,  $\leq 0,015$  масс.% Cu; Al – остальное по ГОСТ 7871) в форме стержня диаметром 18 мм. Выбор данного состава наплавочного материала с низким содержанием железа, кремния и других легирующих элементов позволил исключить их влияние на механизм образования структуры и характеристики диффузионной зоны границы раздела подложка-покрытие.

Основными технологическими параметрами процесса фрикционной наплавки являются: давление ( $P$ ); частота вращения стержня ( $n$ ); а также продольная ( $V_1$ ) и поперечная ( $V_2$ ) линейные скорости перемещения стержня. Среди них наибольшее влияние на качество формирования наплавленного слоя оказывают скорости вращения и продольного перемещения стержня [3]. Поэтому процесс наплавки осуществляли в широком диапазоне вышеуказанных технологических параметров ( $n$  – от 1400 до 2160 об/мин;  $V_1$  – от 82 до 104 мм/мин), выбранных согласно литературным данным [2–4]. Величина давления в зоне соединения была неизменной и составляла 10 МПа.

Изготовленные образцы сталеалюминиевых ФГСК характеризуются бездефектным непрерывным наплавленным слоем, толщина которого не превышает 2 мм. Определено влияние технологических параметров процесса наплавки и способа предварительной подготовки поверхности подложки (механического, химического, лужения, а также комбинированного, т.е. их сочетания) на возможность получения и особенности формирования наплавленного слоя. Показано, что применение процесса лужения или отсутствие предварительной подготовки поверхности подложки не позволяет сформировать соединение в диапазоне значений скоростей вращения стержня от 1400 до 2160 об/мин. В то время, как сочетание механической и химической предварительной обработки поверхности подложки приводит к образованию соединения между подложкой и наплавленным слоем даже при минимальном (82 мм/мин) из опробованных значений продольной линейной скорости перемещения стержня.

Исследования структуры изготовленных образцов ФГСК средствами электронной микроскопии и рентгеноспектрального микроанализа, позволили установить, что во всем диапазоне опробованных параметров процесса наплавки на границе раздела между стальной подложкой и алюминиевым покрытием образуется сплошной интерметаллидный слой, представляющий собой соединения системы Fe-Al разной стехиометрии (рис. 2, а).

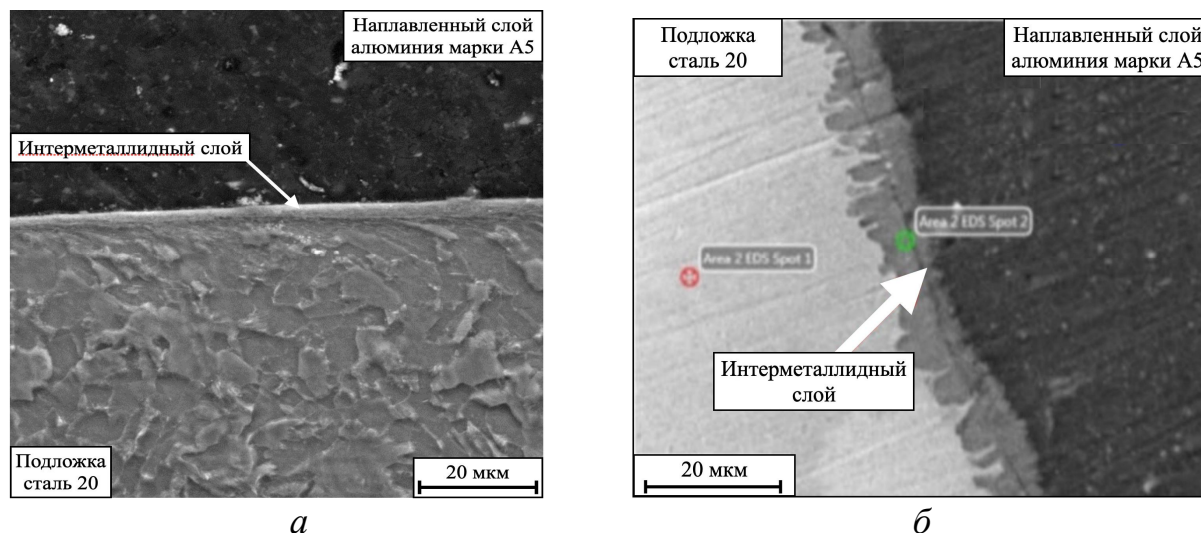


Рис. 2 – Микроструктура интерметаллидного слоя на границе раздела сталь–алюминий в образцах, изготовленных процессом фрикционной (*а*) и дуговой (*б*) наплавки

Причем вследствие низких значений температур нагрева, а также механического воздействия в процессе фрикционной наплавки подобный интерметаллидный слой характеризуется толщиной в 3–4 раза меньше, чем таковой на образцах, полученных авторами работы [5] процессом дуговой наплавки (1–3 мкм против 4–10 мкм, сравнить рис. 2, *а* и *б*), что позволяет ожидать высокие значения адгезионной прочности поверхностного алюминиевого слоя к стальной подложке.

### Литература

1. Рябов, В.Р. Применение биметаллических и армированных сталеалюминиевых соединений / В.Р. Рябов. – М.: Metallurgy, 1975. – 283 с.
2. Gandra, J. Friction surfacing – a review / J. Gandra [et. al.] // J. of mat. proces. technol. – 2014. – Vol.214. – P. 1062–1093.
3. Badheka, K. Friction surfacing of aluminium on steel: an experimental approach / K. Badheka, V. Badheka // Mat. today: proceed. – 2017. – Vol.4, №9. – P. 9937–9941.
4. Li, H. Friction surfacing of aluminium alloy 5083 on DH36 steel plate / H. Li [et all] // Metals. – 2019. – Vol.9. – P. 479–495.
5. Mikheev, R.S. Research of the intermetallics formation mechanism during the synthesis of functionally graded layered steel-aluminum compositions / R.S. Mikheev [et. al.] // IOP conf. series: Mat. Sci. and Eng. – 2020. – Vol.848, №012056. – P. 1–7.

## ОБРОБКА СПЕЦІАЛЬНИХ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ КРУГАМИ З НТМ

Алмазно-абразивні інструменти найбільш ефективні для обробки ПКМ, на основі скляних, вуглецевих, борних і органічних високоміцних і високомодульних волокон. Це обумовлено тим, що використання інструментів на основі синтетичних алмазів дозволяє забезпечити високу продуктивність процесів обробки даних композиційних матеріалів.

Для проведення різання полімерних композиційних матеріалів, нами використовувались алмазно-відрізні круги:

- 1A1R 125×1×32 AC20 160/125 M2-01 – круг з металевого прокату;
- 1A1R 125×1,2×5×32 AC20 160/125 M2-01 – спечений круг на металевій зв'язці;
- 1A1R 125×1,5×5×32 AC20 160/125 E1 – круг на гальванічній зв'язці.

Різання композиту проводили на відрізному верстаті SAFAG (рис. 1). Всього було проведено різання двох типів композиційних матеріалів (стандартний і спеціальний). Подальшому було проведено замір потужності різання і шорсткості поверхні (уздовж і поперек різку). Результати замірів ефективної потужності різання  $N_{ef}$  наведені в табл. 1.

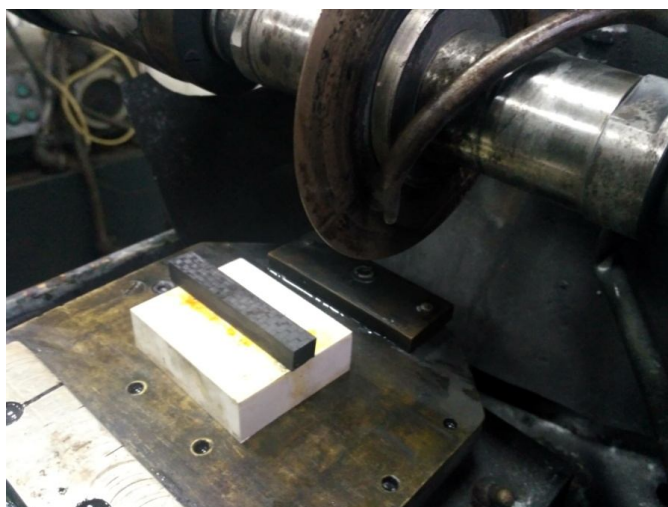


Рис. 1 – Зона різання композиційного матеріалу на верстаті SAFAG

**Таблиця 1 – Ефективна потужність різання  $N_{эф}$ , Вт**

Тип круга	Стандартний композит	Спеціальний композит
Круг з прокату	105	105
Спечений круг	120	115
Гальванічний круг	125	120

Аналіз результатів показав, що потужність шліфування при різанні композиційних матеріалів алмазними відрізними кругами не висока і знаходиться в межах 100–130 Вт. Випробування показали, що різання алмазними кругами спеціального композиту не позначається на утворенні деструкційного поверхневого шару обробленої поверхні композиційного матеріалу і забезпечує якісну обробку.

Результати замірів шорсткості поверхні  $Ra$  зразків композиційних матеріалів наведені в табл. 2.

**Таблиця 2 – Шорсткість поверхні  $Ra$  (мкм) зразків**

Тип круга	Стандартний композит		Спеціальний композит	
	уздовж різу	поперек різу	уздовж різу	поперек різу
Круг з прокату	0,14	0,17	0,14	0,24
Спечений круг	0,35	0,36	0,39	0,48
Гальванічний круг	0,47	0,57	0,39	0,76

Аналіз результатів замірів шорсткості зразків композиційних матеріалів показав, що найменша шорсткість зафіксована при різанні композитів кругами з металевого прокату, а найбільша при різанні кругами на гальванічній зв'язці. Це пояснюється найбільшим виступом алмазних зерен над поверхнею зв'язки в кругах на гальваніці.

Шорсткість поверхні зразків порізнаних кругом на спеченій металевій зв'язці займає проміжне значення. Істотна різниця є при вимірі шорсткості вздовж і поперек різу. При всіх варіантах кругів для різання композиційних матеріалів шорсткість обробленої поверхні уздовж різу помітно менше, ніж шорсткість поперек різу. Це можна пояснити наявністю в структурі композиційного матеріалу волокон основи композиту, поперек яких і відбувається замір шорсткості. Однак, візуально виявити ці волокна після його різання не вдалося.

Отже, в результаті проведених досліджень по різанню спеціального композиту встановлено, що обробка даного типу композиту алмазним інструментом не викликає проблем. Потужність різання

знаходиться в межах допустимої при різанні даних типів композитів і не викликає утворення деструкційного поверхневого шару. Шорсткість обробленої поверхні забезпечує використання даного композиту в готових деталях. Це дає перспективу виготовлення деталей будь-якої складності з спеціального композиту, що істотно розширює сферу його застосування в авіаційній техніці.

*Посвятенко Е.К., Посвятенко Н.І., Аксьом П.А.*  
Національний транспортний університет, Київ, Україна

## **ПОЛІПШЕННЯ ОБРОБЛЮВАНOSTІ АУСТЕНІТНИХ СТАЛЕЙ ЗА РАХУНОК СТРУКТУРНИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ**

Поліпшенню оброблюваності аустенітних сталей сприятиме перетворення парамагнітного стану матеріалу у феромагнітний від дії холодної пластичної деформації (ХПД). При цьому в результаті досить високих швидкостей (без інкубаційного періоду) у наших експериментах відбувалось бездифузійне перетворення аустеніту в мартенсит при зростанні густини дислокацій до  $10^{11}$ – $10^{12}$  см<sup>-1</sup>. Оскільки мартенсит у твердому розчині містить значно меншу кількість вуглецю, ніж аустеніт, гратка першого (ОЦК) стає пересиченою вуглецем і перетворюється з кубічної у тетрагональну (ГЦ).

Слід відзначити, що при зміні структури у аустенітних сталях поряд з мартенситом ще залишався неперетворений аустеніт, кількість якого (у %) залежала від величини деформації ХПД, вуглецю та легувальних елементів. У доевтектоїдних аустенітних сталях (системи «вуглець–хром–нікель») кількість залишкового аустеніту невелика, а у заевтектоїдній сталі 110Г13Л ця кількість у залежності від деформації може сягати 20–30%. Таким чином, у останньому випадку перетворення парамагнітного матеріалу у феромагнітний має дещо слабший ефект у сенсі поліпшення оброблюваності.

За теорією феромагнетизму між структурою металу і магнітними властивостями існує тісний зв'язок, який проявляється у магнітних характеристиках металу. Для магнітного структурного аналізу найбільш цікавим є коерцитивна сила, залишкова намагніченість, намагніченість насичення та індуктивна дія (магнітна індукція).

Методи прямих вимірів коерцитивної сили трудомісткі. Тому нами використовувалось поле залишкової намагніченості. Між цими характеристиками існує прямий зв'язок.

Коерцитивна сила досліджувалась за допомогою стаціонарного автоматичного коерцитиметра ИКС8–3, а магнітна індукція – переносним мілітеслометром ТПУ (рис. 1).



**Рис. 1 – Переносний мілітеслометр ТПУ**

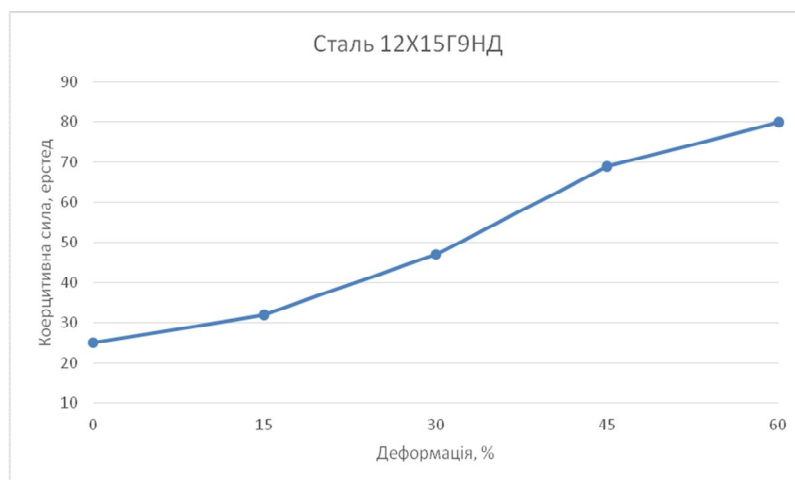
Експериментальна установка включала постійний магніт, що приводився у контакт з відповідною ділянкою зразка аустенітної сталі у початковому та у деформованому стані. Після відведення магніту, ділянка дослідного зразка виявлялась намагніченою до того чи іншого ступеня. Напруженість зовнішнього поля біля створеного магнітом точкового поля вимірювалась мініатюрними зондами, тобто застосовувався відомий ферозондовий метод.

Коерцитивна сила  $H_c$ , ерстеди, у наших дослідах визначалась за експериментальною залежністю:

$$H_c = 8,3H_i \frac{a^3}{\pi r^2}$$

де  $H_i$  – напруженість залишкового магнітного поля, ерстед;  $a$  – відстань ферозонда від зразка, мм;  $r$  – радіус плями зразка, що вимірювалась, мм.

Результати експериментів подано на графіках (рис. 2 та 3).

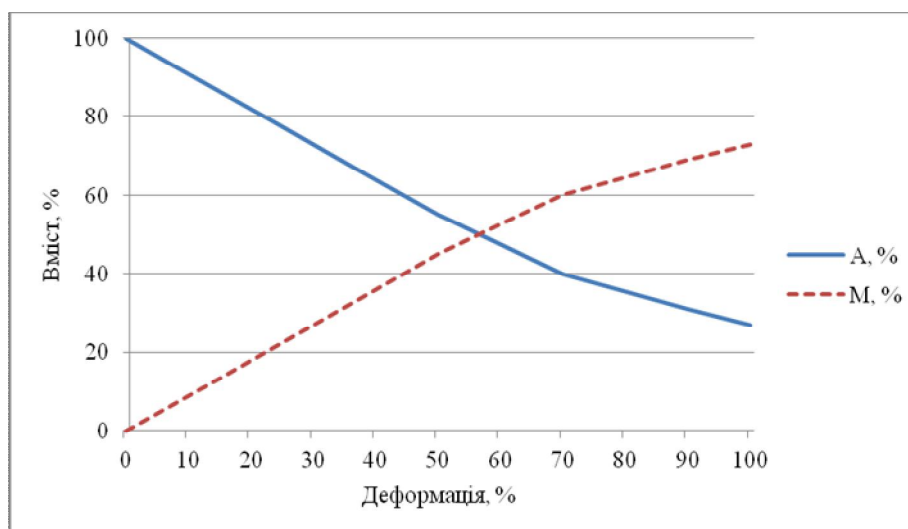


**Рис. 2 – Графік залежності зміни напруженості магнітного поля від ступеню деформації сталі 12Х15Г9НД**



**Рис. 3 – Графік залежності зміни магнітної індукції від ступеню деформації сталі 12Х15Г9НД**

На рис. 4 подано залежність перетворень аустеніту у мартенсит від величини холодної пластичної деформації.



**Рис. 4 – Зміна фазового складу сталі 12Х15Г9НД при аустенітно-мартенситних перетвореннях у залежності від величини холодної пластичної деформації  $\varepsilon$ . А – аустеніт; М – мартенсит**

Між механічними та магнітними властивостями аустенітних сталей існують кореляційні залежності від дії ХПД.

Отже, холодне пластичне деформування з деформаціями до 90%, у процесі котрого відбувається фазове структурне перетворення  $\gamma \rightarrow \alpha'$ , тобто аустенітні сталі частково отримують феромагнітні властивості, сприяє поліпшенню оброблюваності.

Підтвердженням цього слугують отримані нами експериментально зниження коефіцієнта усадки стружки  $\xi$  на 16–25% і повної

довжини контакту  $s$  по передній поверхні інструменту на 22–34% для усіх досліджуваних марок аустенітних сталей, попередньо зміцнених ХПД з деформаціями до 90%. Параметр  $\xi$  і  $s$  процесу різання, як відомо, найбільш повно характеризують оброблюваність матеріалів [1, 2].

### Література

1. Посвятенко, Е.К. Вплив попередньої холодної деформації і рослинних мастильно-охолоджуючих рідин на фізико-механічні та технологічні властивості аустенітних сталей / Е.К. Посвятенко, П.А. Аксьом, Н.І. Посвятенко // Резание и инструмент в технологических системах : междунар. науч.-техн. сб. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2018. – Вып. 88. – С. 172–178.

2. Посвятенко, Е.К. Про природу впливу деформаційного зміцнення на оброблюваність аустенітних сталей / Е.К. Посвятенко, П.А. Аксьом // Вісник Нац. транспорт. ун-ту. Серія «Технічні науки» : наук.-техн. зб. – К. : НТУ, 2019. – Вип. 3 (45). – С. 113–121

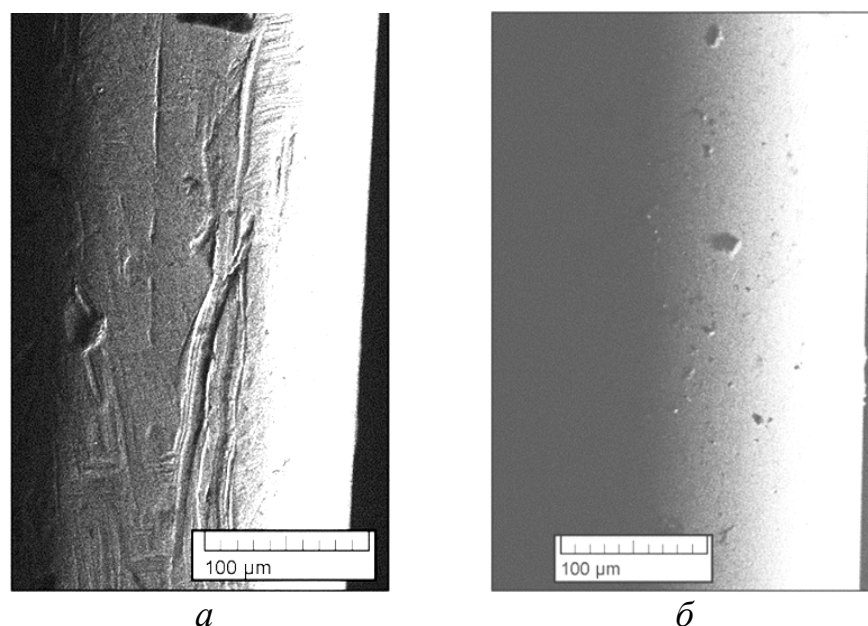
*Просвирнин Д.В., Колмаков А.Г., Пивоварчик С.В.,  
Пруцков М.Е.* Институт металлургии и материаловедения  
им. А.А. Байкова РАН, Москва, Россия  
*Клименко С.А., Копейкина М.Ю.* Институт сверхтвердых  
материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины, Киев, Украина

## ВЛИЯНИЕ СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЁВ НА ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ТРИП-СТАЛИ ВНС9-Ш

Часто для повышения усталостной прочности конструкционных материалов используют различные методы упрочнения поверхностного слоя (цементация, азотирование и др.). Однако в ряде случаев требуется устранить дефекты поверхностного слоя, возникающие при некоторых технологических операциях [1–4]. В настоящей работе было изучено влияние ЭПП на характеристики статической и усталостной прочности тонколистовой аустенитно-мартенситной трип-стали ВНС9-Ш.

Лента из стали ВНС9-Ш, в состоянии поставки, имеет на поверхности следы от последних проходов холодной прокатки и как следствие мелкие дефекты. Последующая подготовка готового из-

деля на виброабразивной установке ВУД500 устраняет некоторые дефекты поверхности и кромок образцов (рис. 1, *а*). Однако, после такой обработки еще остаются дефекты, которые могут негативно сказаться на механических свойствах изделия, являясь концентраторами напряжений. При использовании метода электролитно-плазменной полировки (ЭПП) в основном удаляются все опасные дефекты на поверхности, что должно качественно сказаться на характеристиках усталостной прочности (рис. 1, *б*). Определены механические свойства обеих серий материала (табл. 1).



**Рис. 1 – Боковая поверхность кромок образцов из стали ВНС9-Ш:**  
*а* – серия 1; *б* – серия 2

**Таблица 1 – Механические свойства материала**

№ серии	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_T / \sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	Исходное количество мартенсита, %	Количество мартенсита после растяжения, %:
Серия 1	1823	1600/1031	29	65	76
Серия 2	1849	1600/1456	28	31	80

На кривых растяжения образцов серий 1 и 2 на стадии деформационного упрочнения наблюдается зубчатый характер пластического течения, связанный с образованием в локальных объемах материала мартенсита деформации по механизму «бегущей микрощейки» (рис. 2) [5, 6]. Усиление интенсивности образования мар-

тенсита деформации наблюдается после достижения  $\sim 22\%$  пластической деформации и ее пик происходит в момент разрушения.

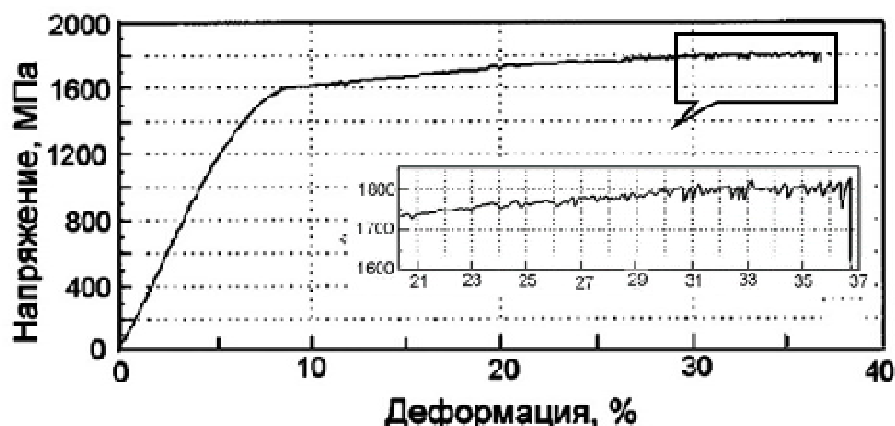


Рис. 1 – Кривые астяжения образцов серий 1 и 2 на стадии деформационного упрочнения

Показано, что ЭПП градиентной трип-стали ВНС9-Ш снижает количество мартенсита в поверхностном слое с 65 до 31%, однако уровень механических свойств при этом практически не изменяется.

С использованием рентгенофазового анализа и метода акустической эмиссии показано, что в процессе циклического деформирования образцов из стали ВНС9-Ш наблюдается добавочное образование мартенсита деформации, а уровень напряжений пределов усталости исходного материала и после проведения ЭПП определяется процессами микротекучести.

### Литература

1. Терентьев, В.Ф. Оценка оптимального количества мартенсита деформации для тонколистовой аустенитно-мартенситной трип-стали ответственного назначения / В.Ф. Терентьев, А.К. Слизов, и Д.В. Просвирни // Деформация и разрушение материалов. – 2017. № 3. С. 33–37.
2. Плотников, Н.В. К вопросу о модели электролитно-плазменного полирования поверхности. / Н.В. Плотников, А.М. Смыслов, Д.Р. Таминдаров // Вестник УГАТУ. – 2013. – Т.17, № 4(57). – С.90–95
3. Yerokhin, A.L. Plasma electrolysis for surface engineering / A.L. Yerokhin, X. Nie, A. Leyland et all. // Surface & Coating Technology. 1999. Vol. 122. P. 73–93.

4. Терентьев, В.Ф. Влияние удаления поверхностного слоя на характеристики и вид кривых статического растяжения тонколистовой аустенитно-мартенситной трип-стали ВНС9-Ш / В.Ф. Терентьев, А.К. Слизов, Д.В. Просвирнин и др. // Деформация и разрушение материалов. – 2017. – №12. – С. 33–37.

5. Потехин, Б.А. Особенности деформации цилиндрических образцов из метастабильных аустенитных сталей при растяжении / Б.А. Потехин // ФММ. – 1979. – Т. 48, №5. – С. 1058–1076.

6. Терентьев, В.Ф. Особенности поведения тонколистовой аустенитно-мартенситной трип-стали ВНС9-Ш в условиях статического и циклического деформирования / В.Ф. Терентьев, Д.В. Просвирнин, А.К. Слизов и др. // Деформация и разрушение материалов. – 2017. – №8. – С.39–47.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 20-08-00556 А*

*Ратуцкая Д.С., Хейфец И.М. Шкурко В.В.  
Институт подготовки научных кадров  
НАН Беларуси, Минск, Беларусь*

## **ЦИФРОВИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ТРАДИЦИОННЫМИ И АДДИТИВНЫМИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМИ СИСТЕМАМИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

Цель проведенных исследований: на основе системного анализа цифровизации процессов управления и перспектив развития технологий и материалов для традиционного и аддитивного производства, разработать программно-аппаратные устройства и технологические модули послойного синтеза изделий из композиционных материалов.

При выбранном объекте исследовательской работы – цифровизации управления производственными системами, в качестве предметов исследования были определены наиболее просто реализуемые и широко доступные процессы: сборочного производства в приборостроении – индукционной пайки в защитной среде; и аддитивного производства в машиностроении – 3D-печати габаритных изделий полимерными композиционными материалами методом FDM (*Fused Deposition Modeling*). В соответствии с поставленной целью, были намечены следующие задачи:

1. Провести системный анализ цифровизации процессов управления традиционным и аддитивным производством: от глобальных интегрированных систем (облачных сервисов), до локальных автономных программируемых устройств (контроллеров).

2. Изучить регулирование процесса с помощью локального автономного устройства (контроллера) и подготовить программное обеспечение для подачи импульсов энергии и управления технологической средой традиционного производства (в частности, для сборочного процесса– индукционной пайки).

3. Обосновать выбор композиционных материалов и спроектировать технологический модуль послойного синтеза габаритных изделий по цифровым двойникам (с использованием облачных сервисов), разработанным в интегрированных системах аддитивного производства (в частности, для 3D–печати методом FDM).

По результатам системного анализа на Ганноверской выставке технологий 2011 года для обозначения начала «эпохи четвертой индустриальной революции» предложен термин «Индустрия 4.0». В настоящее время зарождается новая эпоха производства, в основе которой лежит массовая компьютеризация и глобализация Интернета. Поэтому дальнейшее развитие производства аналитики связывают с машинным обучением ML (*Machine Learning*) и искусственным интеллектом AI (*Artificial Intelligence*). Совместное действие различных «цифровых технологий» позволяет резко повысить эффективность производства, дает возможность полностью реструктуризировать предприятия и создавать на них продукцию, которой до этого не было. Сочетание робототизации производства и 3D-печати изделий на основе машинного обучения с интернетом вещей в глобальной сети и искусственным интеллектом уже сегодня позволяют обеспечивать цифровизированное управление и создавать полностью автоматизированные фабрики.

В этой связи, возникает необходимость в дополнении существующей методологии проектирования систем технологического оборудования как для традиционного субтрактивного, так и нового аддитивного производства, применяющего методы и схемы послойного синтеза и формообразования деталей из композиционных материалов, построенного на использовании различных потоков энергии и внесении совокупности компонентов материала, а также на компьютерном управлении технологическими процессами. На основе системного анализа цифровизации процессов управления и перспектив развития технологий и материалов для субтрактивного и

аддитивного производства, разработаны программно-аппаратные устройства и технологические модули: субтрактивного сборочного производства в приборостроении – индукционной пайки в защитной среде; и аддитивного производства в машиностроении – 3D-печати габаритных изделий полимерными композиционными материалами:

1. Проведен системный анализ цифровизации процессов управления традиционным и аддитивным производством: от глобальных интегрированных систем (облачных сервисов), до локальных автономных программируемых устройств (контроллеров). Показано, что в последнее время усилия многих компаний, производящих программно-аппаратные средства АСУ, направлены на создание систем управления данными в интегрированном информационном пространстве. Проектирование непосредственно под заказ в кастомизированном производстве позволяет добиться наилучших параметров создаваемой продукции, а оптимальный выбор исполнителей и цепочек поставок ведет к минимизации времени и стоимости выполнения заказа [1, 2].

2. Изучено регулирование процесса с помощью локального автономного устройства и подготовлено программное обеспечение для подачи импульсов энергии и управления технологической средой субтрактивного производства. Установка индукционной пайки может работать как в ручном, так и в автоматическом режимах, а переключение режимов осуществляется при помощи виртуального переключателя. Для возможности оперативного управления часть функций дублируется устройствами MeyerTec – кнопками управления, сигнальными лампами, джойстиком. Система управления обеспечивает: сбор технологических параметров от первичных преобразователей; архивирование параметров; удаленный мониторинг; аварийный режим [3, 4].

3. Обоснован выбор композиционных материалов и спроектирован технологический модуль послойного синтеза габаритных изделий по цифровым двойникам, разработанным в интегрированных системах аддитивного производства. Проведен синтез механических и электромеханических составляющих (экструдера в сборе с печатающей головкой и стола в сборе с нагревательным элементом) а также электронных (импульсного блока питания; драйверов шаговых двигателей перемещения осей X-Y-Z и экструдера -DRV8825; графического LCD дисплея 12864 на базе контроллера ST7920; платы управления Arduino Mega 2560 R3 и платы расширения RAMPS 1.4) компонентов системы [5, 6].

Таким образом, проведен системный анализ цифровизации процессов управления традиционным и аддитивным производством: от глобальных интегрированных систем (облачных сервисов), до локальных автономных программируемых устройств (контроллеров). Изучено регулирование процесса с помощью локального автономного устройства и подготовлено программное обеспечение для подачи импульсов энергии и управления технологической средой субтрактивного производства. Обоснован выбор композиционных материалов и спроектирован технологический модуль послойного синтеза изделий по цифровым двойникам, разработанным в интегрированных системах аддитивного производства.

Результаты работы применяются как на производственных предприятиях Республики Беларусь, так и в учреждениях и организациях НАН Беларуси. Разработки нашли применение в учебном процессе ГУО «Институт подготовки научных кадров НАН Беларуси» при создании новой магистерской специализации: Аддитивные технологии.

### **Литература**

1. Крот, А.М. Анализ особенностей применения программного обеспечения для управления качеством продукции / А.М. Крот, В.В. Шкурко, И.М. Хейфец // Современные вопросы производства и ремонта в промышленности и на транспорте : мат. 20-го Международ. науч.-техн. семинара, 23–28 марта 2020 г., г. Тбилиси. – К. : АТМ Украины, 2020. – С.107–111.

2. Шкурко, В.В. Технические средства с программным обеспечением для контроля и управления физико-механическими и геометрическими параметрами качества восстанавливаемых деталей / В.В. Шкурко, И.М. Хейфец, Т.А. Алексеева // Инженерия поверхности и реновация изделий : мат. 20-й Международ. науч.-техн. конф., 01–05 июня 2020 г., г. Киев. – К. : АТМ Украины, 2020. – С. 161–163.

3. Колмаков, А.Г. Разработка автоматизированной системы контроля и управления процессом пайки / А.Г. Колмаков, И.Б. Опарина, В.В. Шкурко, И.М. Хейфец // Инженер-механик. – 2020. – № 3(88). – С. 33–36.

4. Опарина, И.Б. Автоматизированная система контроля и управления процессом индукционной пайки / И.Б. Опарина, А.Г. Колмаков, В.В. Шкурко, И.М. Хейфец // Качество, стандартизация, контроль: теория и практика : мат. 20-ой Международ. науч.-практ. конф., 07-11 сентября 2020 г., г. Одесса. – К. : АТМ Украины, 2020. – С.100–102.

5. Хейфец, М.Л. Свойства и применение полимерных и композиционных материалов в аддитивном производстве изделий методом FDM / М.Л. Хейфец, Н.Л. Грецкий, Д.С. Ратуцкая и др. // Композиционные материалы. – 2020. Спец. выпуск. – С. 145–149.

6. Хейфец, М.Л. Классификация полимерных композиционных материалов, используемых в FDM - технологии / М.Л. Хейфец, Н.Л. Грецкий, Д.С. Ратуцкая и др. // Перспективы развития аддитивных технологий в Республике Беларусь : сб. докл. Международ. о науч. – практ. симпозиума, г. Минск, 30 сентября 2020г. – Мн. : Беларуская навука, 2020. – С. 141–149.

*Севальнёва Т.Г., Колмаков А.Г.* Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН,  
*Севальнёв Г.С.* Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов, Москва, Россия,  
*Клименко С.А., Копейкина М.Ю.* Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины, Киев, Украина,  
*Хейфец М.Л.* Институт прикладной физики НАН Беларуси, Минск, Беларусь

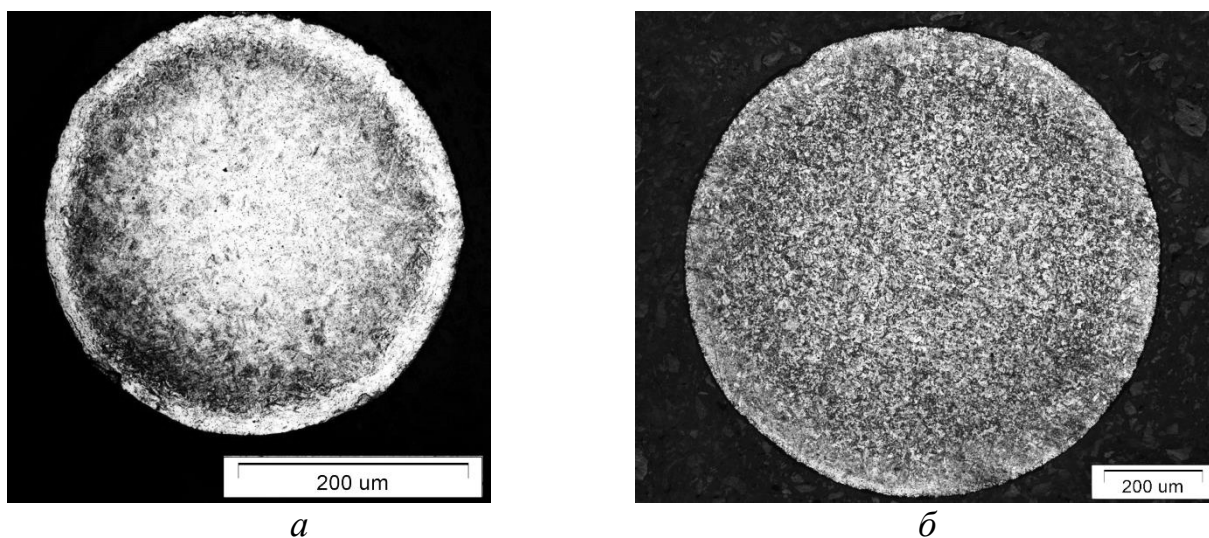
## **ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПРОВОЛОКИ ИЗ СТАЛИ ВНС9-Ш В ПРОЦЕССЕ ХОЛОДНОГО ВОЛОЧЕНИЯ**

В тяжелом машиностроении для изготовления силовых упругих элементов, работающих на статическое или повторное растяжение, целесообразно использовать стали обладающие трип-эффектом, т.е. упрочняющиеся в процессе деформации [1, 2]. Формирование трип-эффекта происходит за счет образования в структуре метастабильного аустенита, который в процессе деформации претерпевает мартенситное превращение [1].

На сегодняшний день наиболее изучено механическое поведение в условиях циклического деформирования тонколистовой (толщиной 0,3 мм) аустенитно-мартенситной трип-стали ВНС9-Ш (23Х15Н5АМ3-Ш) с равномерно распределенными структурными составляющими по сечению листа [3–5]. Однако в процессе получения проволоки формирование структуры происходит иным образом из-за различной схемы деформирования при получении полу-

фабриката. Химический состав проволоки отличается меньшим содержанием углерода и большим содержанием никеля – 18Х15Н6АМЗ-Ш.

В работе проведен анализ формирования структуры и механических свойств высокопрочной коррозионностойкой трип-стали ВНС9-Ш после холодного волочения. В результате холодного волочения формируется градиентная структура по сечению проволоки. По результатам испытаний на растяжение установлено, что проволока после холодного волочения на диаметр 0,36 мм и суммарной степенью обжатия около 86% обладает прочностью около 2900 МПа, однако уровень прочности практически не зависит от скорости испытания. На проволоке диаметром 0,95 мм в большей степени проявляется зависимость от скорости испытания из-за высокого содержания аустенита в структуре. По результатам металлографического анализа было установлено, что после холодного волочения проволоки на диаметры 0,36 и 0,95 мм формируется градиентная структура (рис. 1). Последующие измерения микротвердости по сечению проволоки подтвердили этот эффект (рис. 2).

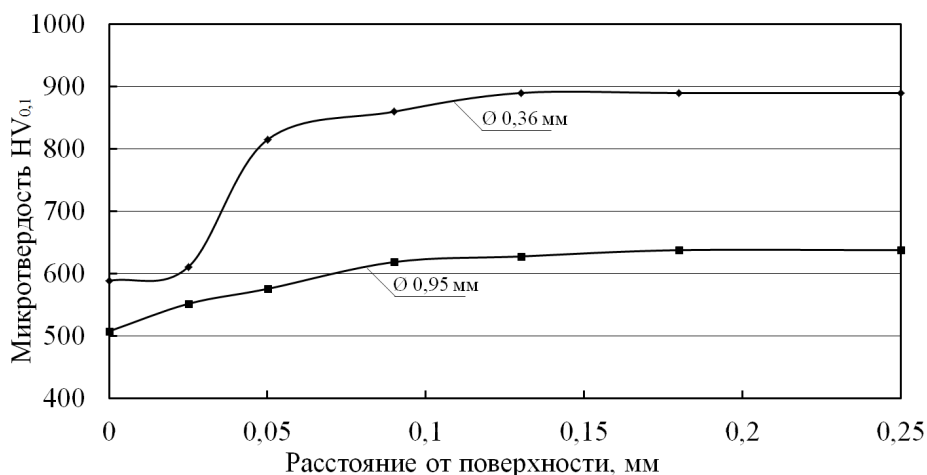


**Рис. 1 – Структура проволоки  $\varnothing$  0,36 (а) и 0,95 (б) мм из стали ВНС9-Ш после холодного волочения: а –  $\times 200$ ; б –  $\times 100$**

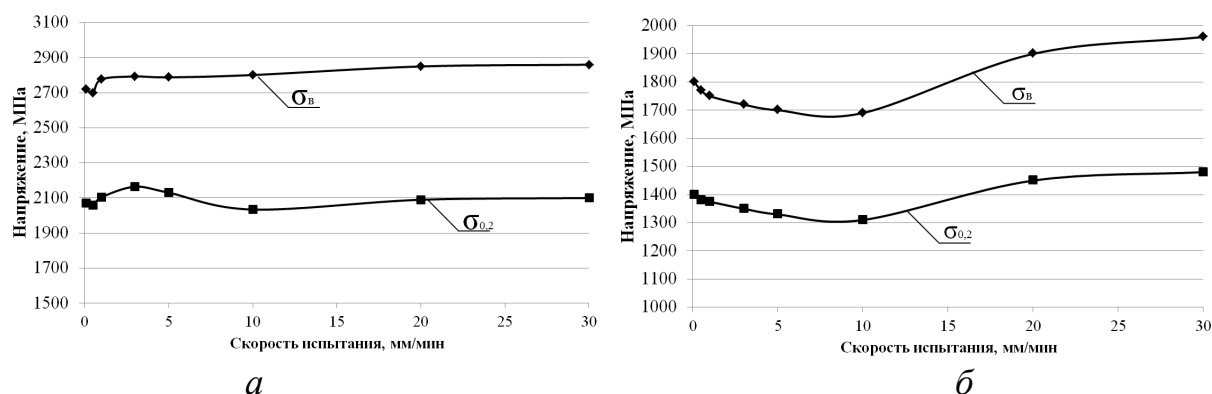
Измерения намагниченности насыщения образцов после холодного волочения позволили определить содержание аустенитной и мартенситной составляющей в структуре проволоки. Для проволоки диаметром 0,36 мм доля мартенситной составляющей в структуре составляет 57%, в проволоке диаметром 0,95 мм – 20,4%.

Исследования механических свойств после статического растяжения показали, что проволока диаметром 0,36 мм менее склонна к

дополнительному упрочнению при различных скоростях испытаний (рис. 3, а). Однако проволока диаметром 0,95 мм дополнительно упрочняется при скоростях испытания от 20 до 30 мм/мин (рис. 3, б).



**Рис. 2 – Результаты измерения микротвердости по сечению проволоки Ø 0,95 и 0,36 мм после холодного волочения**



**Рис. 3 – Зависимость механических свойств проволоки диаметрами 0,36 мм (а) и 0,95 (б) мм из стали ВНС9-Ш**

## Литература

1. Филиппов, М.А. Стали с метастабильным аустенитом / М.А. Филиппов, В.С. Литвинов, Ю.Р. Немировский. – М.: Металлургия, 1988. – 256 с.
2. Георгиева, И.Я. Трип-стали – новый класс высокопрочных сталей с повышенной пластичностью / И.Я. Георгиева // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1976. – №3. – С. 18–26.
3. Терентьев, В.Ф. Исследование зависимости механических свойств и структуры трип-стали ВНС9-Ш от температуры отпуска / В.Ф. Терентьев // Деформация и разрушение материалов. – 2018. – №.6. – С. 20–25.

4. Терентьев, В.Ф. Влияние температуры отпуска на структуру и механическое поведение трип-стали ВНС9-Ш с высоким содержанием мартенсита / В.Ф. Терентьев // Деформация и разрушение материалов. – 2019. – №.6. – С. 31–38.

5. Терентьев, В.Ф. Влияние температуры отпуска на механические свойства и фазовый состав тонколистовой трип-стали / В.Ф. Терентьев // Деформация и разрушение материалов. – 2016. – №11. – С. 30–33.

*Со стороны ИМЕТ РАН работа выполнена в рамках государственного задания № 075-00328-21-00*

*Сенють В.Т. Объединенный институт машиностроения  
НАН Беларуси, Минск, Беларусь*

## **ВЛИЯНИЕ АТТРИТОРНОЙ И ТЕРМОБАРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТОК ВЮРЦИТНОГО НИТРИДА БОРА НА СТРУКТУРУ МАТЕРИАЛА НА ЕГО ОСНОВЕ**

Известные способы синтеза поликристаллических сверхтвердых материалов (ПСТМ) на основе кубического BN (сBN) из графитоподобного (hBN) или вюрцитного (wBN) нитрида бора требуют для своей реализации воздействия высоких температур и давлений порядка 8–10 ГПа, что существенно затрудняет процесс создания таких ПСТМ в производственных условиях [1, 2].

Для снижения параметров превращения используют различные методы активации исходных порошков BN. Так, предварительное деформирование порошка вюрцитного BN методом прокатки способствует фрагментации частиц и увеличению количества дефектов упаковки wBN, что приводит к росту степени превращения и снижению температуры образования сBN по сравнению с недеформированным порошком wBN [3].

Известно, что механоактивация (МА) в атриторах, планетарных и вибрационных мельницах, других устройствах является эффективным способом стимулирования фазовых превращений в BN. В [4] показано, что МА порошка hBN приводит к снижению температуры синтеза и повышению дисперсности и выхода фазы сBN в условиях термобарической обработки.

В работе [5] было исследовано влияние МА в планетарной шаровой мельнице (ПШМ) АГО-2 на процесс получения в условиях высоких давлений и температур ПСТМ из порошка wBN. Было показано, что в результате механоактивации wBN частично переходит как в кубическую (cBN), так и гексагональную (hBN) фазы нитрида бора. Формирование в условиях высоких давлений и температур ПСТМ после МА осуществляется в области стабильности кубической фазы BN, но при более низких р,Т-режимах по сравнению с параметрами превращения в неактивированном wBN.

Недостатком процесса МА в ПШМ по сравнению с обработкой в атриторе является более высокая степень загрязнения шихты в результате намола материала барабана мельницы и размольных тел (стальных шаров), что требует дополнительной химической очистки шихты перед спеканием. Другим недостатком ПШМ является сравнительно небольшой объем барабанов и малая производительность процесса.

Целью настоящей работы является изучение влияния МА порошка wBN в атриторе на процесс образования ПСТМ на основе cBN в условиях высоких давлений и температур.

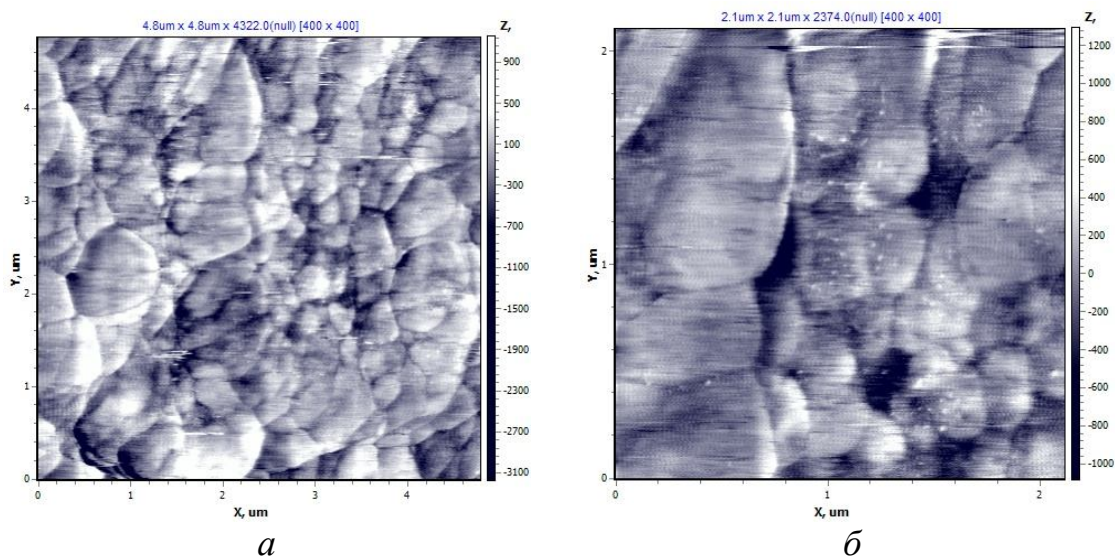
В работе использовали порошок wBN производства ПАО «Запорожский абразивный комбинат» (Украина). Общее содержание нитрида бора в исходном порошке wBN составляет 98,0–98,9% при содержании wBN в пределах 95,5–96,1%.

Механическую активацию порошка wBN осуществляли в атриторе вертикального исполнения с объемом рабочей камеры 1,5 л при скорости вращения импеллера 500 об/мин в течение 20 мин. Отношение масс размольных тел  $M_{\text{ш}}$  к массе обрабатываемого порошка  $M_{\text{п}}$  составило  $(M_{\text{ш}}/M_{\text{п}}) = 50$ . Термобарическое спекание порошков осуществляли в аппарате высокого давления «наковальня с лункой» при следующих параметрах: давление 5,5 ГПа, температура 1650–1850 °С, время спекания до 45 с.

Спектральные исследования порошков wBN проводили методом ИК-спектроскопии с использованием ИК-Фурье спектрометра Nicolet iS10 (Thermo Scientific, США) методом нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) на кристалле алмаза в диапазоне частот 4000–400 см<sup>-1</sup>. Структурные исследования спеченных ПСТМ осуществляли методом рентгеноструктурного анализа на рентгеновском анализаторе Advanced 8D (Bruker, Germany) в Cu K $\alpha$ -излучении, а также с помощью атомно-силовой микроскопии (АСМ) на атомно-

силовом микроскопе «Нанотоп-206» 206 (ОДО «МикроТестМашины», Беларусь).

Анализ данных ИК-спектроскопии порошков wBN до и после МА показал, смещение максимума резонансной полосы поглощения wBN от  $1066\text{ см}^{-1}$  до  $1083\text{ см}^{-1}$ , что обусловлено возникновением напряжений сжатия кристаллической решетки wBN в результате МА. Также отмечается рост интенсивности поглощения на частоте  $1100\text{ см}^{-1}$ , являющейся частотой колебаний кубической фазы BN, что наряду с расщеплением полосы  $1116\text{ см}^{-1}$  wBN может свидетельствовать об образовании при атриторной обработке дефектов упаковки со структурой сфалерита [6]. Структура материала на основе wBN после атриторной и термобарической обработок показана на рис. 1.



**Рис. 1 – Морфология излома материала, полученного из порошка wBN после атриторной и термобарической обработок: поле сканирования 5 мкм (а); 2 мкм (б)**

В основном материал состоит из вытянутых деформированных зёрен wBN размером до 600–800 нм, ориентированных базисной поверхностью перпендикулярно приложенной осевой нагрузке. Наблюдаются также более мелкие (100–200 нм) полиэдрические зерна, относящиеся, по всей вероятности, к фазе sBN. По границам зерен и в межзеренных стыках можно отметить наличие субмикро- и нанопор. Межзеренные границы в спеченном материале достаточно «рыхлые», их ширина достигает 20–40 нм. Также по границам и в стыках зерен располагаются инородные включения в виде тонких прослоек.

Как установлено методом рентгеноструктурного анализа, материал, в основном, состоит из вюрцитной модификации BN (свыше

80% об.). Количество кубической фазы BN в нем составляет порядка 10% об., графитоподобный BN присутствует в количестве до 3,6% об. Кроме указанных фаз в полученном материале обнаружено также до 2,5 об.% примеси железа, что ниже по сравнению с материалом на основе wBN после обработки в ПШМ [5]. Результаты работы показывают возможность использования атриторной обработки порошка wBN для активации фазового превращения в cBN в процессе получения ПСТМ на его основе.

**Выводы.** Исследован процесс получения материала на основе wBN после атриторной и термобарической обработок. Установлено, что в результате МА в wBN возникают напряжения сжатия кристаллической решетки и образуются дефекты упаковки со структурой сфалерита. В результате термобарической обработки механоактивированного wBN получен материал, содержащий до 10% об. кубического BN с размером частиц cBN до 200 нм.

### Литература

1. Инструменты из сверхтвердых материалов / под. ред. Н.В. Новикова и С.А. Клименко. – М. : Машиностроение, 2014.– 608 с.
2. Голубев, А.С. Нитрид бора. Структура, свойства, получение / А.С. Голубев, А.В. Курдюмов, А.Н. Пилянкевич. – К. : Наук. думка, 1987. – 200 с.
3. Волкогон, В.М. Влияние сдвиговых напряжений на полиморфные превращения в вюрцитном нитриде бора / В.М. Волкогон // Сверхтв. мат. –2003.– №1.– С. 22–31.
4. Соколов, А.Н. Исследование влияния механической активации гексагонального нитрида бора на фазовое превращение в кубическую модификацию /А.Н. Соколов // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент–техника, технология его изготовления и применения : сб. науч. тр. – К. : ИСМ им. В.Н.Бакуля, 2005. – Вып. 8.– С. 149–154.
5. Сенють, В.Т. Синтез ПСТМ из механоактивированного вюрцитного нитрида бора с добавками наноалмазов / В.Т. Сенють, С.А. Ковалева, И.В. Валькович и др. // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка : мат. 14-й Международ. науч.-техн. конф., 9–11 сентября 2020 г., г. Минск. – Мн. : Беларуская навука, 2020. – С. 423–429.

6. Бланк, В.Д. Фазовые превращения в твердых телах при высоком давлении / В.Д. Бланк, Э.И. Эстрин. – М. : Физматлит, 2011. – 412 с.

*Сенють В.Т., Витязь П.А., Валькович И.В.* Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск, Беларусь  
*Хейфец М.Л.* Институт прикладной физики НАН Беларуси, Минск, Беларусь  
*Колмаков А.Г.* Институт металлургии и материаловедения им.А.А. Байкова РАН, Москва, Россия

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАНОСТРУКТУРНОГО сVN НА МИКРОТВЕРДОСТЬ СПЕЧЕННОГО ПРИ ВЫСОКОМ ДАВЛЕНИИ ЖЕЛЕЗНОГО ПОРОШКА**

Изменения строения и свойств металлов и сплавов во времени определяются, прежде всего, температурой, а также давлением и другими интенсивными факторами их образования [1]. Происходящие при обработке процессы описываются теорией термической обработки металлов, отражающей кинетику превращений при различных температурах и влияющие на ее ход факторы. Воздействие на материал высоким давлением с одновременной его термообработкой позволяет формировать материал с повышенными физико-механическими свойствами.

С другой стороны, применение добавок различных микро- и нанодисперсных керамических порошков в качестве примесных модификаторов также позволяют повышать механические (и триботехнические) характеристики сплавов и металломатричных композиционных материалов (МКМ) на их основе [2]. Известны примеры успешного применения нанодобавок тугоплавких соединений при получении МКМ на основе железа. Так, добавки ультрадисперсных порошков оксидов алюминия и циркония позволяют увеличить микротвердость спеченного на основе порошка железа материала в 1,5–1,8 раза за счет зернограничного упрочнения [3]. В работе [4] показано, что в спеченном в диапазоне температур 900–1100 °С материале при добавке 0,3–0,5 мас.% ультрадисперсного алмаза (УДА) наблюдается процесс первичной рекристаллизации. Показано, что более совершенная структура материала с УДА обе-

спечивает повышение предела упругости порошкового железа, спеченного в вакууме при температуре 1100 °С от 1240 до 1340 МПа. Введение УДА в состав порошковой стали (0,8% С) наряду с механическими свойствами также способствует повышению триботехнических свойств композита [3]. В работе [5] было показано, что использование нанопорошков кубического нитрида бора (сBN), обладающих высокой энергией направленных химических связей и, как следствие, высокой твердостью, химической стойкостью в агрессивных средах, низким коэффициентом термического расширения, способствует повышению физико-механических и эксплуатационных свойств МКМ.

При этом приложение давления в процессе синтеза материала позволяет предотвратить обратное фазовое превращение сBN в графитоподобную (гексагональную) модификацию BN [6] и обеспечивает наилучшие сочетания структурных характеристик и прочностных показателей основы сплава.

Цель работы – изучение совместного влияния добавки наноструктурного BN, высокого давления и температуры на механические характеристики (микротвердость) спеченного под давлением железного порошка ПЖВ.

Для основы был использован порошок железа ПЖВ (ГОСТ 9849-86). В качестве добавки применяли наноструктурный порошок сBN, содержащий примесь гексагонального BN [7], с размером частиц в пределах 50-200 нм и удельной поверхностью порядка 15 м<sup>2</sup>/г. Предварительно методом механосплавления получали композиционные гранулы механокомпозита Fe+cBN. Для термобарической обработки использовали фракцию композиционного порошка с размером частиц в диапазоне 100–315 мкм.

Термобарическую обработку композиционных гранул осуществляли в аппарате высокого давления «наковальня с лункой» при давлении 1,5 ГПа в течение 20 с. Вначале осуществляли «холодное» сжатие реакционной шихты, помещенной в специальный контейнер из литографского камня, а затем проводили нагрев шихты под давлением методом прямого пропускания электрического тока.

На полученных в результате спекания компактах были приготовлены шлифы, которые затем исследовали методами оптической микроскопии. Микротвердость измерялась на микротвердомере ПМТ-3 алмазным индентором по шкале Виккерса с нагрузкой на индентор 50 г. Количество добавки модификатора сBN изменяли в пределах 1–5 мас. %.

В ходе измерений было установлено, что максимальная микротвердость полученных без добавки VN компактов составляет 2,35–2,40 ГПа. Микротвердость образцов, полученных с добавкой модификатора при тех же параметрах спекания, увеличивается в 1,2–1,5 раза с ростом количества VN в пределах заданного диапазона концентраций и составляет 3,5–3,6 ГПа при концентрации добавки 5 мас. %.

Для повышения химического сродства к металлической матрице и улучшения взаимодействия с ней в процессе спекания на порошок cBN методом химико-термической обработки в защитной атмосфере предварительно было нанесено тонкопленочное покрытие на основе железа. Аналогично методом механосплавления были изготовлены композиционные гранулы механокомпозита Fe+cBN/Fe, которые затем спекали при тех же параметрах давления. Было установлено, что нанесение Fe покрытия на порошок VN позволяет повысить микротвердость образцов с добавкой 5 мас. % cBN/Fe в 1,2–1,3 раза до 4,5–4,6 ГПа по сравнению с добавкой cBN без покрытия при снижении хрупкости спеченного материала.

Таким образом, результаты работы показали перспективность применения наноструктурного cBN для модифицирования спеченных порошковых композиций на основе железа.

## Литература

1. Технологии конструкционных наноструктурных материалов и покрытий / под общ. ред. П. А. Витязя и К. А. Солнцева. – Мн. : Беларус. наука, 2011. – 283 с.
2. Курганова, Ю.А. Конструкционные металломатричные композиционные материалы: учебное пособие / Ю.А. Курганова, А.Г. Колмаков. – М. : Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. – 141 с.
3. Модифицирование материалов и покрытий наноразмерными алмазосодержащими добавками / под общ. ред. П. А. Витязя. – Мн. : Беларус. наука, 2011. – 522 с.
4. Дьячкова, Л.Н. Исследование процесса повышения механических и триботехнических свойств порошковых материалов на основе железа введением ультрадисперсных добавок / Л.Н. Дьячкова, И.И. Лецко // Изв. НАН Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2007. – №3. – С. 21–26.
5. Витязь, П.А. Получение алюмоматричного композиционного материала, модифицированного наноструктурным кубическим нитридом бора / П.А. Витязь, В.Т. Сенюць, М.Л. Хейфец, А.Г. Колма-

ков // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук.— 2018.— Т. 63. — №3. — С. 271–279.

6. Голубев, А.С. Нитрид бора. Структура, свойства, получение / А.С. Голубев, А.В. Курдюмов, А.Н. Пилянкевич. — К. : Наук. думка, 1987. — 200 с.

7. Витязь, П.А. Синтез и применение наноструктурных сверхтвёрдых материалов инструментального назначения / П.А. Витязь, В.Т. Сенють // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. — 2015. — №3. — С. 60–76.

*Сохань С.В., Сороченко В.Г.* Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля  
НАН України, Київ, Україна

## **ОБРОБЛЮВАНІСТЬ КУЛЬ ІЗ КЕРАМІКИ ПРИ АЛМАЗНО-АБРАЗИВНОМУ ШЛІФУВАННІ**

Процес алмазного шліфування керамічних куль, зокрема з карбїду кремнію, карбїду бору, нїтриду кремнію та інших, як і будь-якого крихкого неметалевого матеріалу, докорінно відрізняється від процесу алмазного шліфування металів [1–3]. При шліфуванні крихких неметалевих матеріалів має місце пружно-пластична деформація без руйнування, диспергування кластерів матеріалу під час його пластичної деформації і крихке руйнування зі сколюванням частинок. Імовірність тих або інших механізмів руйнування матеріалу визначається як фізико-механічними властивостями матеріалу, так і навантаженням на алмазні зерна шліфувального інструмента (залежно від режиму обробки). Характерним результатом знімання припуску при шліфуванні є бічні виколки і вириви кластерів з поверхневого шару, що проявляються у вигляді осередків руйнування, які найбільше впливають на формування послабленого поверхневого шару як двошарової комбінації рельєфного і зруйнованого шарів [4]. Кластерну модель утворення й видалення частинок шламу оброблювального матеріалу використовують при теоретичному вивченні закономірностей взаємодії зерен абразивного порошку з оброблюваною поверхнею з неметалевих матеріалів [5, 6].

Характер руйнування крихкого неметалевого матеріалу, яким є кераміка карбїду кремнію, залежить головним чином від величини

нормальної сили, що діє на алмазне зерно. При досягненні нормальною силою критичного значення, необхідного для формування бічних тріщин, руйнування відбувається за рахунок сколювання оброблюваного матеріалу.

Виходячи лише з фізико-механічних властивостей крихких неметалевих матеріалів без врахування власне умов алмазно-абразивної обробки (режиму шліфування і т. і.), авторами [7] запропоновано визначати критичне значення сили, необхідної для

утворення бічних тріщин, із залежності  $P_{кр} = k_p \cdot \frac{K_{1c}^4}{H_\mu^3}$ , де  $k_p$  – постійний коефіцієнт,  $K_{1c}$  – критичний коефіцієнт інтенсивності напружень I типу, а  $H_\mu$  – мікротвердість.

З іншого боку авторами [4] експериментально доведено, що під час алмазно-абразивної обробки величина максимальної напівдовжини дефектів обробки в поверхневому шарі керамічного матеріалу лінійно залежить від критичної довжини  $l_m$  медіанної тріщини при індентуванні, за якої тріщина розвивається стало. Чим менше індекс крихкості матеріалу, а отже, більше критична довжина медіанної тріщини при індентуванні, тим більші значення слід очікувати і напівдовжини максимальної тріщини від обробки, і глибини зруйнованого шару виробу. Критичну довжину медіанної тріщини, за якої остання починає стало розвиватися при індентуванні, в [7] запропоновано визначати як обернено пропорційний квадрату індексу крихкості матеріалу

$l_m = \frac{k_m}{(H_\mu / K_{1c})^2}$ , де  $k_m$  – постійний коефіцієнт.

Наведені показники порівнювали для матеріалів, які використовують для виготовлення керамічних куль, щоб ранжувати їх за оброблюваністю, виходячи з фізико-механічних властивостей (табл. 2). За базу для порівняння було прийнято відповідні показники нітриду кремнію. Отже, за критичним значенням сили, необхідним для утворення бічних тріщин у поверхневому шарі, досліджувані керамічні матеріали  $ZrO_2$ ,  $Si_3N_4$ ,  $Al_2O_3$ ,  $SiC$ ,  $B_4C$  ранжуються таким чином: 1:0,45:0,32:0,18:0,05. Вважається [4], що за меншого критичного значення сили, необхідної для утворення бічних тріщин у поверхневому шарі, є меншим критичне значення площі перерізу зрізу матеріалу на зерні, при якому відбуваються виколи, і відповідно у стільки ж разів менша глибина різання потрібна для утворення виколів. З іншого боку, при однаковій глибині різання виколи на обробленій поверхні керамічного матеріалу мають бути тим біль-

шими, чим меншим є критичне значення сили, необхідне для утворення бічних тріщин у поверхневому шарі.

За критичною довжиною медіанної тріщини, при якому вона починає стало розвиватися при індентуванні, досліджувані керамічні матеріали ранжуються таким чином: 1:0,59:0,47:0,35:0,15. Тобто, глибина зруйнованого шару на обробленій поверхні має бути найбільшою у діоксиду цирконію і найменшою у карбїду бору.

**Таблиця 2 – Фізико-механічні властивості керамічних матеріалів, отриманих методом гарячого пресування або реакційного спікання**

Показник	Типи керамічних матеріалів				
	ZrO <sub>2</sub> [4]	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> (ГП) [4]	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (ГП) [4]	SiC (РС) [8]	B <sub>4</sub> C (ГП) [8]
Густина, кг/м <sup>3</sup> ×10 <sup>-6</sup>	5,95	3,10	3,90	3,12	2,48–2,52
Модуль пружності, ГПа	205	310	365	413	420–430
Мікротвердість H <sub>μ</sub> , ГПа	11,0	13,9	14,9	20,0	22,0–25,0
Міцність при згині σ <sub>з</sub> , МПа	230	690	930	370	210–230
Індекс крихкості H <sub>μ</sub> /K <sub>1c</sub>	2,50	3,23	3,55	4,35	6,29–6,41
Критичний коефіцієнт інтенсивності напружень I типу K <sub>1c</sub> , Па·м <sup>-1/2</sup> ×10 <sup>6</sup>	4,4	4,3	4,2	4,6	3,5–3,9

Аналіз отриманих результатів порівняння схильності керамічних матеріалів до тріщиноутворення, а також наведені особливості процесу алмазного шліфування куль з кераміки дозволяє нам стверджувати, що оброблюваність послідовно покращується по мірі того, як критична сила різання зменшується. В подальшому, для оцінки ефективності оброблюваності керамічних матеріалів отримані теоретично-аналітичні результати можуть служити науковою основою при дослідженні і вивченні впливу технологічних режимів обробки на показники продуктивності алмазного шліфування керамічних куль.

### Література

1. Филатов, Ю.Д. Закономерности финишной алмазно-абразивной обработки монокристаллического карбида кремния / Ю.Д. Филатов, А.Г. Ветров, В.И. Сидорко и др. // Сверхтв. мат. – 2013. – №5. – С. 63–71.

2. Филатов, Ю.Д. Полирование элементов оптико-электронной техники из монокристаллического карбида кремния / Ю.Д. Фила-

тов, А.Г. Ветров, В.И. Сидорко и др. // Сверхтв. мат. – 2015. – №1. – С. 63–71.

3. Прихна, Т.А. Исследование стойкости к окислению, механических характеристик материалов на основе МАХ-фаз систем Ti–Al–(C,N) и возможности их использования в качестве инструментальных связок и для полирования / Прихна Т.А., Старостина А.В., Лицендорф Д. и др. // Сверхтв. мат. – 2014. – №1. – С. 14–26.

4. Гусев, В.В. Технологическое обеспечение качества обработки изделий из технической керамики / В.В. Гусев, Л.П. Калафатов. – Донецк : ГВУЗ “ДонНТУ”, 2012. – 250 с.

5. Филатов, Ю.Д. Кластерная модель механизма усталостного износа SiO<sub>2</sub>-содержащих материалов при их полировании инструментом со связанным полировальным порошком на основе диоксида церия. Часть 1 / Ю.Д. Филатов, В.В. Рогов // Сверхтв. мат. – 1994. – №3. – С. 40–43.

6. Филатов, Ю.Д. Механизм образования микрорельефа поверхности при обработке стекла / Там же. – 1991. – №5. – С. 61–65.

7. Морозов, Е.М., Зернин М.В. Контактные задачи механики разрушения / Е.М. Морозов, М.В. Зернин. – М. : Машиностроение, 1999. – 544 с.

8. Кулич, В.Г. К вопросу о возможностях получения высокоплотных керамических изделий на основе карбида кремния / В.Г. Кулич, В.И. Куш, В.Н. Ткач, А.Л. Майстренко // Сверхтв. мат. – 2009. – №1. – С. 18–35.

*Сохань С.В., Сороченко В.Г., Возный В.В.*  
Институт сверхтвёрдых материалов  
им. В.Н. Бакуля НАН Украины, Киев, Украина

## **К ВОПРОСУ О ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ПРОЦЕССА АЛМАЗНО-АБРАЗИВНОЙ ДОВОДКИ КЕРАМИЧЕСКИХ ШАРОВ ПОДШИПНИКОВОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

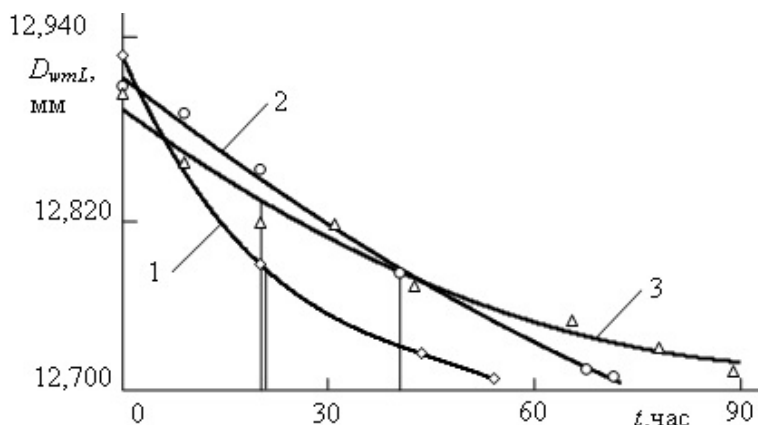
С ростом требований к надежности авиационных двигателей разрабатываемые технологии должны быть направлены на обеспечение работоспособности подшипников в условиях высоких частот вращения (параметр быстроходности  $d \cdot n = 3 \cdot 10^6 - 4 \cdot 10^6$  мм·об/мин). Одним из перспективных подходов к решению этих вопросов явля-

ется применение гибридных подшипников качения с керамическими элементами. Низкая плотность керамики по сравнению с плотностью стали, низкий коэффициент теплового расширения позволяют уменьшить номинальный радиальный зазор в подшипнике и обеспечить большую жесткость опор и низкие вибрации ротора в эксплуатации. Кроме этого, низкий коэффициент трения, высокая прочность и уникальная износостойкость являются перспективным материалом для изготовления из них прецизионных шаров. В то же время, степень реализации указанных уникальных свойств этих материалов в реальные изделия во многом определяется решением проблемы их эффективной механической обработки резанием, которая является ответственной и наиболее трудоёмкой в технологическом цикле изготовления гибридных подшипников качения. В данной работе предпринята попытка установить влияние вида материала, способа его получения, а также зернистости алмазной пасты и времени обработки на производительность прецизионного процесса алмазно-абразивной доводки керамических шаров подшипникового назначения.

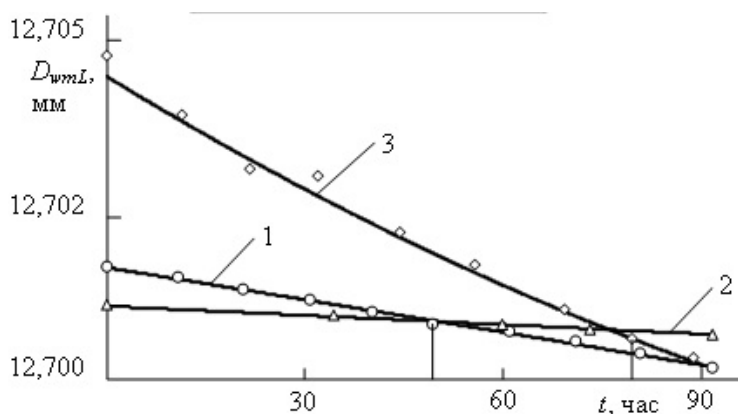
Исследования проводили при алмазно-абразивной доводке керамических шаров диаметром 12,700 мм из горячепрессованного карбида бора  $B_4C$  (ГП), карбида бора полученного в аппарате высокого давления  $B_4C$  (АВД) и нитрида кремния, полученного в аппарате высокого давления  $Si_3N_4$  (АВД). Обработку проводили на технологических стендах на базе доводочных станков модели 3E814, оснащенных преобразователями частоты электрического тока. Это позволяло бесступенчато регулировать частоту вращения нижнего диска-притира в пределах 5–42 об/мин. Верхний диск – притир не вращался и прижимался к обрабатываемым шарам с усилием прижима в пределах от 50 до 200 Н. Шары размещались в кольцевой канавке специального профиля нижнего диска и отделялись друг от друга сепаратором. Одновременно обрабатывалась партия шаров в количестве 40 штук. В процессе доводки на технологических переходах последовательно применяли алмазно-абразивную пасту АСМ зернистостью 28/20, 14/10, 2/1 и 1/0, смешанную с индустриальным маслом И-20А. Финишную доводку шаров выполняли на технологическом стенде на базе станка модели ВШ-ДЗ. Процесс обработки заканчивали, когда вариация диаметра шаров была меньше или равна 0,4 мкм.

Влияние времени алмазно-абразивной доводки пастами АСМ 28/20, АСМ 14/10, АСМ 2/1 и АСМ 1/0 на производительность процесса (уменьшение среднего диаметра шаров в партии) для карбида

бора  $B_4C$  (ГП), карбида бора  $B_4C$  (АВД) и нитрида кремния  $Si_3N_4$  (АВД) представлены на рис. 1 и 2.



**Рис. 1 – Влияние времени доводки пастами АСМ 28/20 и АСМ 14/10 на уменьшение среднего диаметра шаров в партии:**  
 1 –  $B_4C$  (ГП), 2 –  $B_4C$  (АВД), 3 –  $Si_3N_4$  (АВД)



**Рис. 2 – Влияние времени доводки пастами АСМ 2/1 и АСМ 1/0 на уменьшение среднего диаметра шаров в партии:**  
 1 –  $B_4C$  (ГП), 2 –  $B_4C$  (АВД), 3 –  $Si_3N_4$  (АВД)

Учитывая тот факт, что при принятой схеме обработки может увеличиваться разноразмерность диаметра шаров в партии, после каждого цикла обработки выполняли ранжирование шаров с уменьшением среднего диаметра в пределах четырех групп, каждая из которых начиналась с одного из четырех шаров, который имел наибольший диаметр. Шары располагали в сепараторе последовательно группа за группой с уменьшением значения диаметра в пределах группы относительно направления вращения нижнего диска.

Анализ результатов проведенных исследований позволяет сделать следующие выводы. Независимо от зернистости алмазно-абразивной пасты производительность процесса прецизионной доводки керамических шаров, которые получены методом спекания

путем электрического нагревания в аппаратах высокого давления существенно отличается от такой для шаров, полученных традиционным методом горячего прессования. Полученные результаты позволяют научно обоснованно назначать величину припуска на разных стадиях алмазно-абразивной доводки для исследуемых материалов не зависимо от заданного значения вариации их диаметра.

*Тимофеева Л.А., Колесник М.А., Грибанов М.І.*  
Український державний університет залізничного  
транспорту, Харків, Україна

## **ФОРМУВАННЯ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ НА ЧАВУННИХ ДЕТАЛЯХ ТРАНСПОРТНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ**

Чавун містить в своєму складі значну кількість вуглецю, який може знаходитись у вигляді цементиту або графіту кулястої чи пластинчастої форми. Маючи хімічну активність, він повинен брати участь в формуванні поверхневого шару або взаємодіяти з його елементами.

Розглянемо чавуни, в яких більша частина вуглецю знаходиться в графіті пластинчастої форми, і сталі, в яких увесь вуглець знаходиться в цементиті.

Для простоти розуміння припустимо, що графітні включення в матриці чавуну мають форму неправильного циліндра, в якому є западини і опуклості. Довжина включення  $l$  і діаметр  $2a$  зв'язані умовно співвідношенням  $l/2a > 1$ . Пластинчаста форма включення нерівноважна і при нагріванні тою чи іншою мірою намагається перейти в кулясту. Причина, яка зумовлює перенесення маси вуглецю, що відбувається в цьому випадку, полягає ось в чому. Припустимо, що в одному місці включення графіту звуженим за рахунок стискуючої сили матриці. В такому випадку виникає градієнт хімічного потенціалу, який зумовлює спрямоване перенесення вуглецю від ділянки, де має місце звуження, до опуклих і навіть циліндричних ділянок. Процес, який супроводжується зменшенням товщини включення, завершується його розпадом в даному місці.

Ця умова дрібника і сфероїдизації графітного включення означає, що поява звуження супроводжується зменшенням питомої площі поверхні. Цей вуглець намагається випалити в об'ємі покрит-

тя або виходити на зовнішню поверхню шару. Характерно при цьому також формування не пластинок графіту, а кульок.

Для цього було розглянуто кінетику виходу вуглецю на зовнішню поверхню. Потік вуглецю визначається різницею граничних концентрацій в залізі і фазі, яка утворюється:

$$y = D\Delta n/\delta, \quad (1)$$

де  $D$  – коефіцієнт дифузії вуглецю в межах фази;  $\Delta n = n_c^{Fe} - n_c^\Phi, n_\gamma^{Fe}$ ;  $n_c^\Phi$  – граничні концентрації вуглецю в залізі і відповідно у фазі, що утворюється;  $\delta$  – товщина шару.

Вважаємо, що концентрація вуглецю на зовнішній поверхні  $n_c^\Phi$ , а на межі шар – основний метал  $n_c^{Fe}$ .

Число  $dN$  атомів вуглецю, які виходять за час  $d\tau$  на одиницю поверхні, можна визначити як  $dN = yd\tau = D\Delta n d\tau/\delta$ , де  $\delta$  знаходимо із рівняння (1). За час  $\tau$  на поверхню вийде таке число атомів вуглецю:

$$N = \int_0^\tau D \frac{\Delta n d\tau}{k\tau^{1/2}} = 2D \frac{\Delta n}{k} \tau^{1/2}$$

Ці атоми вуглецю і утворюють зародок в вигляді кульок, які збільшуються у часі.

Середня концентрація вуглецю, яка вимірюється на поверхні, може бути визначена, якщо відняти число атомів вуглецю в новій фазі від числа  $N$  його атомів, які знаходяться в при поверхневому шарі.

$$N = l/v,$$

де  $l$  – глибина зондування при визначенні концентрації вуглецю;  $v$  – об'єм, який випадає на 1 атом вуглецю.

Коефіцієнт вуглецю повинен збільшуватися за параболічним законом, тому коефіцієнт дифузії вуглецю можна знайти, якщо перетворити вираз 2 так:

$$D = \frac{k}{2\Delta n} \frac{N}{\tau^{1/2}}$$

Коефіцієнт дифузії вуглецю в об'ємі шару можна оцінити також по кінетиці розпаду в перлі пластичних включень цементиту на кульки графіту. Припустимо, що цей процес проходить за двома дифузійними механізмами: через матрицю і по межі поділу матриця – виділенню. Характерний час розпаду за порядком величина може бути описаний таким виразом:

$$\tau = \frac{kTR^3}{\gamma v D_v C_o}$$

де  $T$  – температура;  $R$  – радіус сфери закруглення графітного включення;  $\gamma$  – поверхневий натяг на межі поділу;  $D_v$  – коефіцієнт об'ємної дифузії;  $C_0$  – концентрація вуглецю на твердому розчині матриці.

Із виразу виходить, що

$$D_v C_0 = kTR^3 / (\gamma v \tau)$$

У випадку хіміко-термічної обробки залізовуглецевих сплавів перегрітого водяного розчину солей при підстановці робочих значень в формулу коефіцієнт дифузії вуглецю при розпаді пластичної структури цементиту в фазі складає  $10^{-9} \dots 10^{-8}$  см<sup>2</sup>/с. Це співпадає з оцінкою коефіцієнта дифузії при накопиченні вуглецю на поверхні.

Проведені розрахунки дозволяють зробити висновок, що при формуванні поверхневого шару в парогазовому середовищі має місце висхідна дифузія вуглецю за рахунок розпаду пластинчастої структури

*Тимофеева Л.А., Тимофеев С.С., Колесник М.А.*

Український державний університет  
залізничного транспорту, Харків, Україна

## **СУЧАСНІ ВИМОГИ ДО СПОСОБІВ ВІДНОВЛЕННЯ ЦИЛІНДРО-ПОРШНЕВОЇ ГРУПИ ТРАНСПОРТНИХ ДИЗЕЛІВ**

Статичний аналіз показує, що більшість пар, які труться виходять з ладу у зв'язку зі зносом. На відновлення та ремонт деталей та обладнання в Україні витрачається щорічно значні суми державних та приватних коштів. Серед них домінуючу роль займають деталі циліндро-поршневої групи дизельних двигунів. Підвищення їх надійності та довговічності є дуже важливою задачею залізничної промисловості. Відмови в роботі двигунів, які зв'язані зі зносом його деталей, викликають довгий простій, значні витрати запасних частин, підвищуються витрати на обслуговування та експлуатацію.

Циліндро-поршнева група, а зокрема, поршень, кільця та гільзи циліндрів, працюють під дією високих тисків, сил інерції та температури, піддаючись інтенсивному зносу. Зворотньо-поступальні рухи поршня, зі змінною швидкістю при змінюючись температурі, тиску та шару змазки, утворюють складні режими тертя поршня та кілець по дзеркалу циліндрів. У верхній зоні зупинки поршневого

кільця біля камери згорання температура середовища досягає 350 °С, знижуючись у нижній частині гільзи до 70–90 СV

В теперішній час використовуються декілька марок дизелів. Із них у V-образних дизельних двигунах гільзи працюють в найбільш тяжких умовах. Гільза практично по всій довжині схильна до тиску. У зв'язку з цим заходом по підвищенню стійкості гільз цих дизелів, безумовно, можуть бути повністю перенесені на інші типи дизелів. Конструкція гільзи залежить від типу робочого процесу та теплового режиму роботи двигуна.

У двигунів найбільш схильна до теплових та механічних навантажень верхня частина гільзи, тут температура та тиск газів найбільш високий. Нижня частина гільзи виявляється в кращих умовах, так як приймає менший тиск та теплове навантаження. При русі поршня сила тертя між кільцями та гільзою досягає максимуму в момент зміни напрямлення руху, тобто коли швидкість поршня прагне до 0.

Якість внутрішньої поверхні гільз циліндрів досягається правильністю геометричної форми гільз необхідною шорсткістю (чистою) при обробці їх поверхні. Для доводки поверхні гільз використовується хонінгування, яке забезпечує величину шорсткості від 0,05 до 0,1 мкм. А також поверхневе легування, зокрема, хіміко-термічна обробка або створення на поверхні припрацьованого шару.

Найбільш наочно процес цього зносу можна побачити в зоні верхньої мертвої точки у першого компресійного кільця, де постійно виникають зони сухого тертя та утворюють вузли схоплення різних розмірів. Від'єднанні частини деформованого твердого металу, які закріплені на одній із поверхонь, продовжують брати участь у процесі тертя, пошкоджуючи поверхню та створюючи умови розвитку мікросхоплення. По мірі підвищення швидкості та товщини масляної плівки, об'єм та розмір вузлів схоплення та ризик зносу зменшується. Інтенсивність цього процесу залежить від властивостей матеріалу та якості плівок, які розділять поверхні.

В зв'язку з цим підвищується зносостійкість деталей, які труться (гільза циліндро-поршневе кільце) зазвичай досягається підбором матеріалу та створенням на його поверхні спеціального зносостійкого шару з підвищеним антифрикційним покриттям.

## **ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ПОКРЫТИЙ И ИХ КЛАССИФИКАЦИЯ**

Интенсивное развитие технологических методов инженерии поверхности, развитие производств деталей с покрытиями и необходимость автоматизации технологического проектирования обуславливают проблему систематизации имеющейся в этой сфере научно-технической информации. Одни и те же детали могут быть изготовлены из различных материалов и заготовок, полученных и обработанных по различным технологическим схемам, в том числе при сочетании с большим количеством вариантов осаждения покрытий и последующих методов их обработки. Такие тенденции развития современного производства объясняют интерес к систематизации и схематизации известных методов получения покрытий на деталях, выявление их общих характерных признаков и классификация по соответствующим группам. Такая классификация значительно упрощает изучение и использование методов получения покрытий и производства деталей с ними, полнее выявляет их технологические возможности, преимущества и недостатки, а также направления дальнейшего совершенствования и развития. Классификация методов получения покрытий создает предпосылки для их формализации и алгоритмизации, что необходимо для автоматизации конструкторско-технологической подготовки производства. Использование основных принципов построения и развития методов получения покрытий облегчает их изучение, а также разработку и создание новых.

Метод получения покрытия определяется видом используемой энергии (механической, химической, электрической, тепловой и др.), видом и составом исходного материала покрытия, свойствами получаемых покрытий, производительностью, сущностью процесса формирования и формообразования покрытия, видами технологических источников энергии, типом применяемого оснащения или обрабатывающей среды и их характеристиками, кинематикой процесса и его схемой и пр. Использование защитных и функциональных покрытий на деталях приводит к повышению качества машин,

их технологичности. Применение различных материалов основы и покрытий детали приводит к синергетическому эффекту, проявляющемуся в превышении результирующих показателей свойств деталей по сравнению со свойствами отдельных материалов.

Процессы формирования покрытий очень сложны и основаны на использовании различных физических явлений, технологических операциях и переходах. Поэтому для систематизации и классификации методов получения покрытий необходимо использовать комплекс разнообразных признаков.

***Пространственные признаки формирования покрытий.*** Эта группа признаков характеризует технологические возможности по формообразованию покрытий и поверхностных слоев деталей. Под формообразованием в данном случае понимается создание поверхностных слоев или покрытий на поверхностях деталей или на их локальных участках с требуемой геометрией (формой и размерами), заданной толщины и распределением ее по поверхности, макро-строением покрытий (наличие слоев и подслоев из различных или одинаковых материалов, микро-каналов и выступов и пр.), топографии поверхности покрытия, требуемого распределения механических и физико-химических свойств в объеме поверхностного слоя при сохранении требований к геометрическим показателям качества детали в целом. По характеру формообразования способы получения покрытий можно подразделить на точечные, линейные и поверхностные.

1. Точечные способы формируют покрытия последовательным осаждением на поверхность основного материала элементарных точечных объемов (микроочек) материала покрытия. К ним можно отнести электроискровое легирование

2. Линейные способы формируют покрытия последовательным осаждением на поверхность основного материала элементарных линейных объемов (микроваликов) материала покрытия. К ним можно отнести методы электродуговой, плазменной, лазерной наплавки валиками, газотермического напыления и др.

3. Поверхностные способы формируют покрытия последовательным осаждением на поверхность основного материала элементарных поверхностных объемов (микрослоев) материала покрытия. К ним можно отнести электрошлаковую наплавку, химическое и

электрохимическое осаждение, индукционную наплавку, вакуумные конденсационные методы и др.

4. Комбинированные способы используют для получения многослойных покрытий, часть которых сплошные, а часть – дискретные.

Формообразование покрытий осуществляют с помощью твердых инструментов или таких элементов технологических систем получения покрытий (ТС) как плазменная струя, лазерный луч, струя материала покрытия и др. а также при взаимодействии поверхностных слоев изделия с активной обрабатывающей средой.

В первых двух случаях формообразующий элемент технологической системы (твердый инструмент, расходуемый материал, формообразующий элемент системы) и заготовка (деталь) совершают относительные перемещения с кинематическими параметрами, обеспечивающими формирование заданного слоя. Совокупность кинематических параметров и расходных характеристик формообразующего элемента ТС являются исходными для моделирования формообразования. Для одного и того же способа осаждения покрытий могут использоваться разнообразные конструкции формообразующих элементов и механизмов формообразующих движений.

***Временные признаки формирования покрытий.*** Эта группа определяет характер формирования покрытий во времени.

1. Непрерывные, когда в течение всего процесса осаждения формируются покрытия. К ним относятся методы, использующие источники энергии непрерывного действия – гальваническое и химическое осаждение, большинство методов наплавки, обработки лазерами непрерывного действия, газотермического напыления (для них характерны высокая скорость осаждения одиночных частиц, формирующих пятна и валики напыления, единичный слой и пр.).

2. Пульсирующий – детонационно-газовое напыление; импульсные лазеры создают пульсирующее излучение; плазменная наплавка пульсирующей дугой; наплавка пульсирующей лазерной плазмой; электроискровое легирование; импульсное газодинамическое напыление; вибродуговая наплавка.

3. Импульсный – плакирование сваркой взрывом; электроконтактное припекание; электровзрывное напыление композиционных покрытий; взрывное импульсное напыление.

***Ведущие физические процессы, определяющие формирование покрытия на поверхности детали.*** Эта группа характеризует ос-

новные физические процессы, определяющие формирование покрытия на поверхности детали: 1 – плавление и отвердевание исходного материала покрытия; 2 – уплотнение слоя диспергированных частиц – нагрев - пластическая деформация - схватывание; 3 – направленное осаждение и взаимодействие диспергированных частиц; 4 – конденсация испаренного материала покрытия; 5 – пластическая деформация исходного материала покрытия; 6 – взаимодействие диспергированных частиц и связывающих материалов; 7 – электролиз растворов или расплавов; 8 – кристаллизация из растворов или расплавов; 9 – направленное взаимодействие наэлектризованных или намагниченных частиц; 10 – химическое осаждение.

***Характер формообразования покрытия на поверхности детали:*** 1 – нанесение (наращивание) материала покрытия; 2 - нанесение (наращивание) материала покрытия с последующим частичным его удалением; 3 – нанесение (наращивание) материала покрытия с последующим его уплотнением и пластической деформацией; 4 – нанесение (наращивание) материала покрытия с последующим его пространственным перераспределением; 5 – насыщение поверхностного слоя детали (диффузионное легирование, имплантация, внедрение твердых частиц, пропитка).

***Структура технологии изготовления детали с покрытием по этапам:*** 1. Заготовительный  $\Rightarrow$  нанесение покрытия  $\Rightarrow$  обработка покрытия и доработка детали; 2. Заготовительный с одновременным нанесением покрытия  $\Rightarrow$  обработка заготовки с покрытием (резание с опережающим пластическим деформированием; 3. Получение покрытия в виде корки покрытия  $\Rightarrow$  заполнение корковой оболочки основным материалом детали  $\Rightarrow$  обработка заготовки с покрытием; 4. Заготовительный  $\Rightarrow$  нанесение 1-го слоя покрытия  $\Rightarrow$  обработка 1-го слоя покрытия  $\Rightarrow$  нанесение 2-го слоя покрытия  $\Rightarrow$  обработка 2-го слоя покрытия и т.д.

***Состояние исходного материала покрытия и заготовки:*** твердое (компактное); твердое (порошок); жидкое; твердо-жидкое; газ; раствор и др.

***Вид энергии, непосредственно вводимой в технологическую зону осаждения покрытий (ТЗ).***

***Энергия, определяющая формирование покрытий и их адгезионной и когезионной прочности.***

**Физическая схема источника энергии, действующего в технологической зоне:** 1. Точечный неподвижный (лазерный луч при точечном оплавлении покрытий, электроискровое нанесение дискретных покрытий, воздействие неподвижной дуги,...); 2. Точечный движущийся (лазерная или электроннолучевая наплавка по слою порошка, микроплазменное напыление, ...); 3. Линейный неподвижный (оплавление слоя порошка щелевым соплом), ..; 4. Линейный движущийся (многоэлектродная наплавка и ленточным электродом; 5. Поверхностный неподвижный (газотермическое напыление на неподвижную деталь, плакирование взрывом, ...); 6. Поверхностный движущийся (газотермическое напыление, ...); 7. Объемный неподвижный (электрошлаковая наплавка, индукционная наплавка, механотермическое формование, ..); 8. Объемный движущийся (наплавка трением с перемешиванием, электроконтактное припекание, ...).

**Вид технологического источника энергии:** 1. Электрическая дуга; 2. Плазменная дуга; 3. Плазменные струи, генерируемые плазмотронами и другими методами; 4. Лазерное излучение различной длины волны; 5. Световое излучение широкого спектрального диапазона (например, сфокусированного излучения ксеноновых ламп); 6. Газовое пламя; 7. Сильноточные пучки заряженных частиц; 8. Ионные источники; 9. Электронагрев сопротивлением; 10. Индукционный нагрев; 11. Газовая детонация; 12. Взрывные источники; 13. Фрикционные; 14. Приложение давления механическим воздействием инструмента.

**Энергоемкость процессов формирования покрытий.**

Вид среды обработки: 1 – воздух; 2 – инертные газы; 3 – химически активные газы; 4 – вакуум; 5 – вода техническая; 6 – электролиты; 7 – расплавы металлов; 8 – суспензии; 9 – псевдожизненные слои; 10 – растворы.

Давление среды обработки: низкое; среднее; высокое.

Виды относительных рабочих движений изделия и инструмента (обрабатываемой среды).

Скорость осаждения покрытий: низкая; средняя; высокая.

Виды получаемых покрытий: сплошное; дискретное; рельефное; конструкционное; многослойное и пр.

*Хейфец М.Л.* Институт прикладной физики  
НАН Беларуси, Минск, Беларусь,  
*Колмаков А.Г., Просвирнин Д.В., Пивоварчик С.В.,*  
*Пруцков М.Е.* Институт металлургии и материаловедения  
им. А.А. Байкова РАН, Москва, Россия  
*Клименко С.А., Копейкина М.Ю.* ВОО АТМ Украины,  
Киев, Украина

## **ПРИЧИНЫ И ПРОЦЕССЫ РАЗРУШЕНИЯ СТАЛЕЙ С TRIP/TWIP ЭФФЕКТОМ, ВОЗМОЖНОСТИ УЛУЧШЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ**

Способность класса TRIP (Transformation Induced Plasticity) и TWIP (Twinning Induced plasticity) сталей совмещать высокие показатели прочностных и пластичных характеристик, способностью к глубокой вытяжке, позволяет применение в промышленности. Несмотря на все достоинства, эти стали имеют проблемы со стабильностью свойств усталостной прочности. Предположительно, данный недостаток связан с образованием концентраторов напряжения в виде мартенсита деформации в поверхностных слоях. Предполагается разработка композитных материалов на основе данного типа сталей и сложных структурных поверхностей, обладающих способностью улучшить свойства материала – снять негативное воздействие дефектов поверхности [1].

Работа посвящена решению проблемы разработки создания новых и улучшения существующих высокопрочных сталей с TRIP/TWIP эффектом сталей, и металлических покрытий. Проведена оценка зависимости микротвердости образцов и количества  $\alpha$ -мартенсита деформации при разных стадиях статического и усталостного нагружения. Оценено влияние электроэрозионной резки, применяемой при вырезания образцов и изделий из листа-заготовки, на механические свойства.

Материалом основы для создания композита с металлическим покрытием, был выбран представитель высокопрочной стали ВНС-9Ш (23Х15Н5АМ3-Ш) поставляемая в виде холоднокатаной ленты толщиной 0,28 мм.

Анализ полученной кривой статического нагружения со скоростями деформации  $\dot{\epsilon}$  от  $8,3 \times 10^{-4} \text{ с}^{-1}$  до  $8,3 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$  стали ВНС-9Ш вы-

явил три основные стадии деформации: стадию микротекучести, текучести и деформационного упрочнения. Ярко выраженная протяженная площадка текучести достигавшая 8% связана с процессами двойникования и сдвигообразования с образованием мартенсита деформации. Мы связываем интенсивное упрочнение с последовательным прохождением стадий текучести и деформационного упрочнения. Повышение механических свойств было зафиксировано и при электроэрозионной резке на кромках образцов, что обусловлено влиянием мартенсита и фазового перехода в процессе резанья из-за локального микронагрева зоны реза и практически моментального охлаждения.

Этап работы по получению композитов на основе стали ВНС-9Ш и магнетронных покрытий из Ti, TiN и CrN толщиной  $\approx 3$  мкм. Нанесенные покрытия на основе Ti и CrN показали удовлетворительную адгезию со стальной подложкой, в то время как покрытия TiN имели низкую адгезию. Исследования микротвердости полученных покрытий выявили, что покрытия на основе CrN имеют более высокие показатели твердости по сравнению с покрытиями из Ti и TiN. Для покрытия CrN – 1100 HV, а покрытий из Ti составила 560 HV, и TiN – 750 HV.

Полученные экспериментальные данные показали перспективность направления по созданию композитного материала ионно-вакуумным методом. Результаты исследования восполняют недостаток знаний о причинах и процессах разрушения сталей с TRIP/TWIP эффектом при модификации поверхности или протекающих процессов связанных с нанесением покрытий из металлических материалов. Планируются работы по отработке методики создания композитов на основе стали ВНС-9Ш и покрытий из других металлов и сплавов. Будут проведены комплексное исследование влияния покрытий на статические и усталостных характеристики композиционных образцов на основе стали ВНС-9Ш.

## **Литература**

1. Просвирнин, Д.В. Структурные особенности и прочностные свойства TRIP/TWIP сталей изделий для эндоваскулярных операций / Д.В. Просвирнин, М.С. Ларионов, С.В. Пивоварчик, А.Г. Колмаков // Перспективные материалы. – 2020. – №9. – С. 5–18.

2. Терентьев, В.Ф. Влияние электролитно-плазменной полировки на механические свойства аустенитно-мартенситной трип-стали

ВНС9-Ш / В.Ф. Терентьев, А.К. Слизов, А.М. Смыслов и др. // Деформация и разрушение материалов. – 2020. – №2. – С. 21–28.

3. Терентьев, В.Ф. Влияние удаления поверхностного слоя на механические свойства и вид кривых статического растяжения тонколистовой аустенитно-мартенситной трип-стали / В.Ф. Терентьев, А.К. Слизов, Д.В. Просвирнин и др. // Деформация и разрушение материалов. – 2017. – №12. – С. 16–20.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 20-08-00556 А*

*Шелковий О.М., Руднев О.В., Гуцаленко Ю.Г.  
Національний технічний університет  
«ХПІ», Харків, Україна*

## **ЕКОЛОГІЧНОЗБЕРІГАЮЧЕ ВИСОКОПРОДУКТИВНЕ АЛМАЗНО-ІСКРОВЕ ШЛІФУВАННЯ З ВВЕДЕННЯМ ТВЕРДИХ МАСТИЛ**

Алмазно-іскрове шліфування своїми технологічними перевагами, що виходять із стабільної розвиненості ріжучого рельєфу, зобов'язане дії електричних розрядів в зоні обробки, включеної в генеруючий їх електричний ланцюг. Характерна дії електричних розрядів в повітрі озонотерапія навколишнього середовища дозволяє розглядати цей метод обробки в ряду екологічно перспективних за своєю природою.

Сучасна актуалізація мінімізації споживання промисловими технологіями водних ресурсів, в тому числі мастильно-охолоджуючих технологічних засобів на водній основі, пов'язана з мультирегіональним питним водним голодом як глобальним екологічним викликом розвитку цивілізації і відповідає сучасним технократичним стратегіям Європейського Союзу (Industry 4.0), Японії (Society 5.0), Китаю (Made in China 2025) та інших провідних світових економік.

Підтримка дією електричних розрядів на зв'язку круга розвиненості його робочого рельєфу значно стримує зростання термомеханічної напруженості масового мікрорізання в зоні алмазно-іскрового шліфування з перебігом процесу в часі. Введення слідуючого контролю безпосередньо за станом ріжучого рельєфу (йо-

го висотністю і гостротою) або параметрами термомеханіки шліфування (температурний режим, потужність шліфування, силове навантаження в напрямку головного руху по зніманню припуску і на непродуктивну дисипацію споживаної енергії), з механізмом зворотного зв'язку в управлінні електричними режимами в ланцюзі ініціації електричних розрядів за певним алгоритмом, дозволяє підтримувати термомеханічну напруженість робочого процесу на заданому рівні, нижчому ніж середні показники звичайного алмазного шліфування з тим же рівнем режимної продуктивності. Знижений рівень термомеханічної напруженості алмазно-іскрового шліфування в виробничих операціях є порівнянної механікою є апріорно привабливою перевагою процесу для апробації методології мінімального змащування, в тому числі екологічно орієнтованої безводної організації подачі мастила в зону різання.

В НТУ «ХПІ» проведені дослідження процесу алмазно-іскрового шліфування з використанням різних твердих мастильних матеріалів стосовно обробці твердих сплавів.

Експериментальні дослідження проводилися на універсально-заточному верстаті моделі 3Д642Е, модернізованому для реалізації процесу алмазно-іскрового шліфування шляхом установки джерела живлення і додаткових струмопровідних пристроїв. Як джерело живлення використовувався спеціальний генератор імпульсів НО6506, вироблений на виробничій базі проектно-технологічного та експериментального інституту «Укроргверстатінпром» в Україні (м. Харків) і перетворюючий змінний струм напругою 380 В в уніполярний імпульсний з регульованою частотою і силою струму.

Експерименти проводилися при середньому значенні сили струму 4–6 А, напрузі холостого ходу 60–80 В, скважності 2 при частоті проходження електричних імпульсів 66 кГц.

Шліфування велося зі швидкістю 25 м/с за пружною схемою, коли поперечна подача здійснюється не жорстко механізмом подачі, а задається певним зусиллям за допомогою вантажів на спеціальному пристрої. Нормальний тиск у поданій серії експериментів становив 1,2 МПа.

Включення алмазно-абразивного інструменту в електричний ланцюг здійснювалося безпосереднім струмопідведенням до нього через графітову щітку. У процесі досліджень застосовувались алмазні круги чашечної форми 12А2-45° АС6-100/80 М1-01-4 з несучим корпусом з алюмінієвих сплавів. Для їх електричної ізоляції на посадковому отворі і в зоні кріпильного контакту методом

плазмоелектролітичного оксидування утворювали оксидне покриття товщиною 30–45 мкм.

Подача твердого мастильного матеріалу здійснювалася контактним способом. Литий циліндр з цього матеріалу діаметром 10–12 мм встановлювався в пристосуванні і з невеликим зусиллям (5 г) притискався до робочої поверхні алмазного круга під кутом  $60^\circ$ , що забезпечувало безперервний контакт мастильного матеріалу з нею в процесі шліфування.

При виборі твердих мастильних матеріалів в експериментальних дослідженнях керувалися відомими рекомендаціями, згідно з якими базові компоненти за своїми властивостями повинні привносити зниження мікросхоплювання, задирання, фрикційного нагрівання та сили тертя в контактній зоні деталь-інструмент. Для порівняння з використанням традиційного технологічного засобу, а саме 3% -ного содового водного розчину (ТС1), що вводиться поливом, використовували три склади твердих мастильних матеріалів: стеарин технічний (ТС2); себацінову кислоту (ТС3); суміш стеарину з себаціновою кислотою (1:1, ТС4).

Отримані відповідно до прийнятої організації експериментальних досліджень дані про хвилинну продуктивність шліфування ( $Q$ ,  $\text{см}^3/\text{хв}$ ) і витрату надтвердого абразиву на одиницю об'ємного знімання матеріалу ( $q$ ,  $\text{мг}/\text{см}^3$ ) при обробці інструментального твердого сплаву Т5К10 з використанням даних способів введення і складів технологічних засобів наведені на рис. 1 (від ТС1 до ТС4, зліва направо).

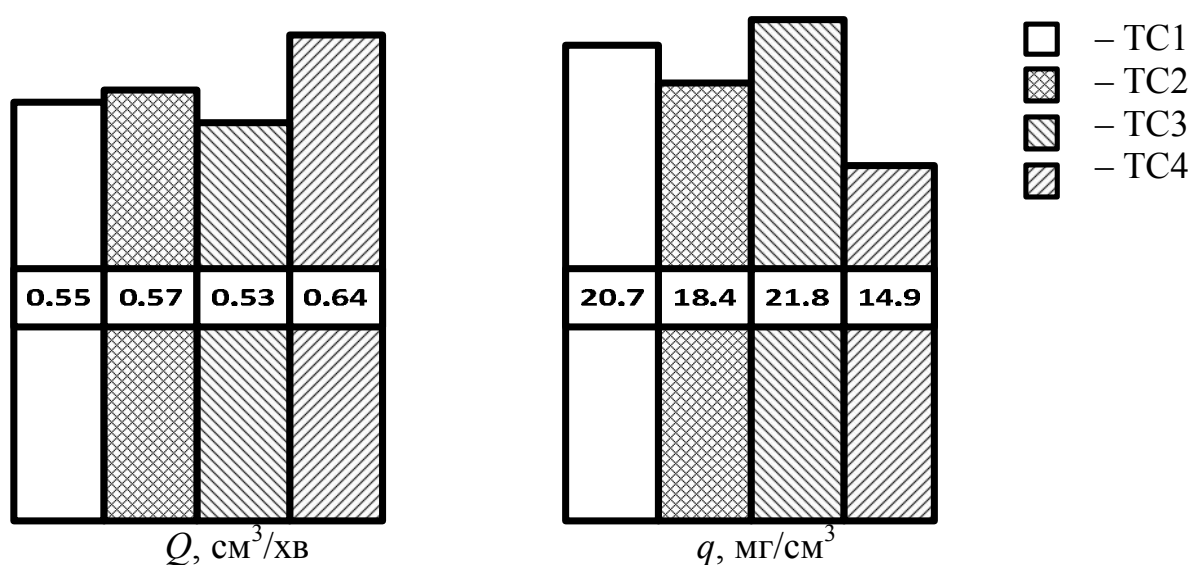


Рис. 1 – Технологічні показники використання мастильно-охолоджуючих технологічних засобів різного складу і способу подачі

Як це впливає з представлених результатів, організація обробки зі струменевим поливом забезпечує кращі показники, ніж застосування себацінової кислоти, але поступається застосуванню стеарину і, особливо, суміші рівних частин стеарину і себацінової кислоти. У результатах із застосуванням кислоти пояснення підвищеного зносу інструменту і, відповідно, зниження продуктивності, слід, мабуть, шукати в випереджаючому об'єктивну потребу оновлення ріжучого рельєфу і діючому додатково до ерозійного зниження зв'язки круга витравляючому ефекті впливу кислоти як на межзерену металеву зв'язку круга, так і на внутрізерену металеву зв'язку – неминучу спадковість каталітичного синтезу технічних алмазів.

Кращі технологічні показники по продуктивності обробки та зносу інструменту, в порівнянні як зі звичайною організацією мастильно-охолоджувального середовища (струменевий полив 3%-ним содовим водним розчином), так і з самостійним застосуванням інгредієнтів демонструє використання рівноважної суміші технічного стеарину і себацінової кислоти. У порівнянні з традиційним супроводом процесу алмазно-іскрового шліфування струменевим поливом, з використанням цього твердого мастилу фіксується збільшення продуктивності обробки ( $Q$ ) понад 15%, а зниження зносу інструменту ( $q$ ) – понад 25%. Тому рівноважну суміш стеарину і себацінової кислоти розглядаємо як найбільш перспективну для подальших розробок в напрямку використання твердих мастил альтернативно водним розчинам в зниженні термомеханічної напруженості алмазно-абразивної обробки.

Наведені результати експериментальної практики дозволяють розглядати метод алмазно-іскрового шліфування із застосуванням технології мінімального змащування перспективним в промислових застосуваннях як такий, що забезпечує отримання комплексного ефекту підвищення продуктивності обробки та, внаслідок сприятливої термомеханічної спадковості в поверхневому шарі об'єкта обробки, функціонального якості, при скороченні споживання води на виробничі потреби.

## **ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ АЛЮМІНІДУ ТИТАНУ І СТАЛІ 40Х9С2 ДЛЯ БІМЕТАЛЕВИХ КЛАПАНІВ АВТОМОБІЛЬНИХ ДВИГУНІВ**

Жароміцні сплави на основі алюмінідів титану є перспективними матеріалами для використання в інноваційній енергетиці, авіаційному та автомобільному двигунобудуванні. Однією із причин, що стримує використання алюмінідів титану у конструкціях авіаційних і автомобільних двигунів є складність їх технологічної обробки, зокрема зварювання, обумовлена надзвичайно низькою пластичністю при кімнатній температурі, високою чутливістю до термічного та деформаційного циклів обробки.

Становить наукову цінність та практичний інтерес дослідження можливості отримання бездефектних з'єднань алюмініду титану із зносостійкою сталлю мартенситного класу стосовно до виготовлення біметалевих клапанів автомобільних двигунів. Виробничий досвід свідчить про ефективність використання для отримання стикових з'єднань різнорідних матеріалів способів зварювання тиском – контактного стикового (КСЗ) опором і зварювання тертям (ЗТ). Розробка технологій КСЗ і ЗТ жароміцних сплавів у різнорідному сполученні пов'язана з низкою проблем, зокрема з нерівномірністю процесів нагрівання і деформації приконттактних об'ємів матеріалів, значному опорі пластичній деформації і високому електричному опорі алюмініду титану.

Попередній досвід свідчить про ефективність використання наношаруватих фольг (НФ) у якості проміжних прошарків при зварюванні тиском жароміцних сплавів. Зокрема, використання НФ евтектичного складу при КСЗ  $\gamma$ -алюмініду титану забезпечує висококонцентроване виділення тепла, сприяє активації зварюваних поверхонь, локалізації пластичної деформації у зоні з'єднання, дозволяє уникнути виникнення різноманітних дефектів.

Мета досліджень – встановлення можливості формування бездефектних з'єднань алюмініду титану Ti-46Al-2Cr-2Nb із сталлю 40X9C2 мартенситного класу при способах зварювання тиском.

Розроблена комплексна методика досліджень передбачала отримання зварних з'єднань при безпосередньому КСЗ опором і ЗТ і при зварюванні з використанням НФ різного хімічного складу. Експери-

менти проводили на машині для КСЗ опором К766, і на установці СТ120, що реалізує технологію ЗТ з регульованим гальмуванням обертання. У якості проміжних прошарків використовували НФ на основі систем евтектичного типу (Cu-Ni/Al-Ni, Cu/Ti). Товщина НФ становила 30–70 мкм, товщина кожного шару – 20–100 нм.

Зону зварних з'єднань досліджували з використанням світлової та електронної скануючої мікроскопії, локального мікрорентгеноспектрального аналізу. Вивчення мікроструктури зони з'єднання проводили на мікроскопі «Neophot-32», ОЖЕ-мікрозонді JAMP-9500F, «Jeol». Локальний мікрорентгеноспектральний аналіз (МРСА) проводили за допомогою EDS-аналізатора «INCA-450», «Oxford Instruments».

Встановлено, що при канонічних технологіях КСЗ і ЗТ у зоні з'єднання сплаву Ti-46Al-2,2Nb-2,1Cr із сталлю 40X9C2 спостерігаються тріщини та пористість, обумовлена реакційною дифузією елементів. У зоні з'єднань, отриманих конвенційним ЗТ, ширина зони концентраційних змін у зоні з'єднання складає близько 20 мкм, при цьому наявні ділянки шириною до 10 мкм з постійним хімічним складом з мікротвердістю до 5500 МПа.

Зварний стик, розподіл мікротвердості, мікроструктуру і результати МРСА з'єднання  $\gamma$ -TiAl+40X9C2, отриманого комбінованим ЗТ з використанням НФ системи Ti-Al/Ni-Cu, представлено на рис. 1 і 2.

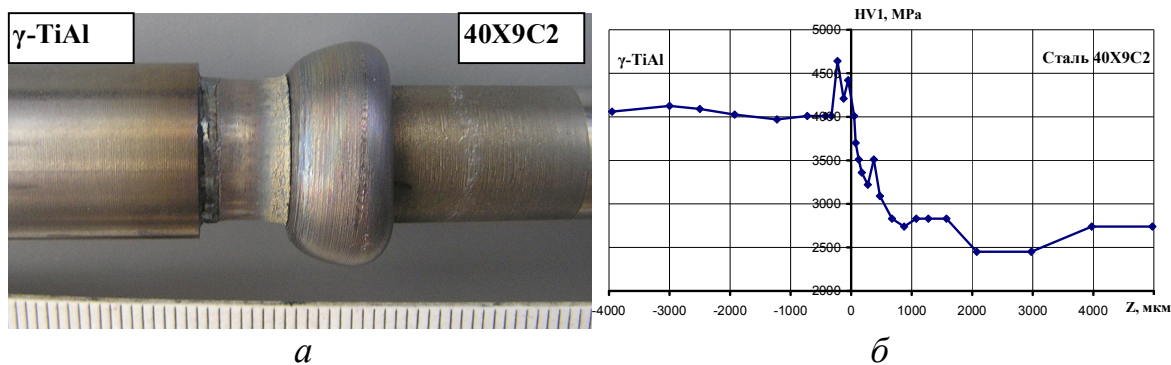
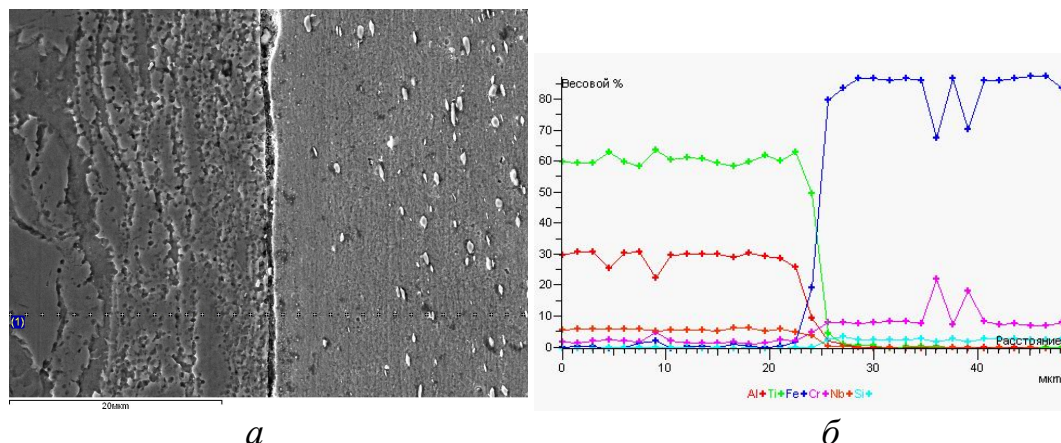


Рис. 1 – Зварний стик (а), зміна мікротвердості у зоні з'єднання (б)

Дослідженнями встановлено, що при комбінованому ЗТ з використанням проміжного прошарку НФ системи Cu-Ni/Al-Ni забезпечується твердофазний характер формування з'єднання без дефектів, тріщин і залишків проміжного прошарку. Ширина зони концентраційних змін у зоні з'єднання не перевищує 8 мкм, при цьому відсутні ділянки з постійним хімічним складом і пористість.

Отримані результати свідчать про можливість формування бездефектних з'єднань алюмініду титану Ti-46Al-2Cr-2Nb із сталлю 40X9C2 та актуальність подальших досліджень по оптимізації тех-

нологій зварювання тиском і режимів термічної обробки біметалевих клапанів автомобільних двигунів.



**Рис. 2 – Мікроструктура (а), зміна концентрації елементів у зоні з'єднання (б)**

*Павлова Г.О., Косач Н.І. ДП «Харківський машинобудівний завод «ФЕД», Харків, Україна*

## **УПРАВЛІННЯ ЖИТТЄВИМ ЦИКЛОМ ПРОДУКЦІЇ У СИСТЕМІ ЯКОСТІ НА ПІДПРИЄМСТВАХ АВІАЦІЙНОЇ ГАЛУЗІ**

Впровадження системи управління якістю (СУЯ) на підприємствах авіаційної, космічної та оборонної галузей є стратегічним рішенням для підвищення їх показників функціонування, а також дозволяє більш структуровано визначати ключові фактори, які необхідно враховувати при визначенні контексту організації, де поряд із зацікавленістю сторін, зовнішніми і внутрішніми чинниками, ефективністю, якістю і гнучкістю, з'являються соціальна відповідальність, екологічні та культурні чинники, безпека, які також впливають на здатність організації досягати стійкого успіху [1].

Як відомо, одним з доказових елементів якості продукції є наявність впровадженої СУЯ, яка сертифікована і відповідає вимогам ISO 9001 [2] та EN 9100 [3], яку розглядають як систему управління процесами задля досягнення поставленої мети. Кожний з процесів складається з набору взаємопов'язаних або взаємодійних видів діяльності, які й перетворюють входи на виходи (результати), які впливають на кінцеву мету процесу – задоволення вимог зацікавлених сторін. Тому дуже важливо, щоб результат виконання кожного

процесу було успішним, а це у свою чергу залежить від правильності визначення і контролю життєвого циклу продукції, як загальної моделі СУЯ, так і кожного елементу процесу.

Життєвий цикл для кожного процесу СУЯ ґрунтується на трьох основних принципах:

- у кожному процесі є зв'язок між завданнями, діяльністю і результатами;
- мінімізація залежності кожного процесу від інших процесів;
- внутрішня діяльність кожного процесу чітко прописана.

Треба враховувати, що кожний процес або діяльність всередині процесу може здійснюватися як послідовно, так і паралельно та розпочинатися у будь-який момент життєвого циклу СУЯ. При цьому немає визначеного порядку і послідовності їхнього виконання: будь який процес або елемент процесу може виконуватися одночасно з будь-якими іншими процесами (елементами процесу). Тому для більш конструктивного виконання будь-якого завдання за кожним процесом пропонується скласти матрицю взаємодії стадій і процесів із зазначенням часу на його виконання з урахуванням того, що кожний процес може бути розбитий на додаткові процеси, які є частинами основного процесу, з послідовністю їх виконання.

Взагалі, для кращого розуміння змісту процесів СУЯ до їхнього опису пропонується додавати відомості про стадії життєвого циклу продукції, на яких їх виконують. Як приклад, у табл. 1 наведено матрицю взаємодії стадій і процесів життєвого циклу СУЯ.

**Таблиця 1 – матрицю взаємодії стадій і процесів життєвого циклу СУЯ**

Процеси СУЯ	Стадії життєвого циклу продукції			
	здум	розроблення	виробництво	підтримання
<b>Процес укладання контракту</b>				
Аналізування	так	так	так	так
Закупівля		так	так	так
Постачання				так
<b>Технічні процеси</b>				
Планування	так	так	так	так
Виготовлення		так	так	
Вимірювання		так	так	так

Конкретний набір процесів та послідовні зв'язки між ними залежить від обраної моделі життєвого циклу продукції. Всі типові процеси СУЯ стосовно життєвого циклу продукції пропонується умовно поділити на такі:

- контрактні (розгляд пропозицій замовника, умов закупівлі та постачання);
- організаційні (керування планами (моделлю життєвого циклу), інфраструктурою, людськими ресурсами, якістю);
- планування (керування прийнятими рішеннями, конфігурацією, ризиками, гарантування якості);
- технічні (виготовлення, вимірювання, верифікація, гарантування якості, використання, постачання тощо).

При цьому треба враховувати, що будь-які зміни щодо продукції, будь то умови застосування, характеристики, модифікація структури підприємства, обов'язки розробника, виробника, споживача тощо потребують постійного перегляду процесів та термінів їх використання. Тому що процеси динамічні і потрібно враховувати зміни на будь яких стадіях життєвого циклу продукції.

Таким чином, упровадження управління життєвим циклом продукції у систему якості підприємств з урахуванням вимог ISO 9001 і EN 9100 дозволяє більш структуровано визначати ключові фактори, які необхідно враховувати при визначенні контексту організації, що у свою чергу більш ефективно, якісно та гнучко, з урахуванням вимог зацікавлених сторін, зовнішніх і внутрішніх чинників, дозволить досягати стійкого успіху.

## **Література**

1. Косач, Н.І. Впровадження ISO 9100 на авіакосмічних підприємствах України / Н.І. Косач, Г.О. Павлова // Мат. 20-ї Міжнарод. наук.-практ. конф. «Якість, стандартизація, контроль: теорія та практика», 07–11 вересня 2020 р., м. Одеса. – К. : Ф\АТМ України, 2020. – С. 70–72.

2. ISO 9001:2015 Quality management systems. – Requirements

3. EN 9100:2018 Quality Management Systems. – Requirements for Aviation, Space and Defence Organizations

## **ПРОФІЛЬНЕ ШЛІФУВАННЯ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС ВУГЛЕВИДОБУВНИХ КОМБАЙНІВ**

При виготовленні приводів шахтних комбайнів виникають проблеми технологічного забезпечення якості обробки зубчастих коліс на фінішних операціях. У значній мірі це обумовлено утворенням на операціях зубошліфування температурних дефектів на оброблюваних поверхнях, а також відносно низькими показниками точності й шорсткості їх обробки. У результаті чого поширені поломки зубів коліс, знижується їхня зносостійкість і довговічність, а це вимагає ремонту приводів у важких шахтних умовах. Відомо, що підвищити якість обробки зубчастих коліс і відповідно їх надійність і ресурс роботи можна шляхом застосування ефективних технологій зубошліфування, які забезпечують зниження теплової й силової напруженості процесу й підвищення продуктивності обробки.

Зміст даної роботи полягає в розробці нової технології профільного шліфування зубчастих коліс з використанням алмазно-абразивного інструменту та технології його правки алмазними правлячими роликками. Така технологія дозволяє порівняно з іншими методами обробки суттєво підвищити зносостійкість, знизити коефіцієнт тертя, підвищити точність обробки та знизити висотні параметри шорсткості зубчастих коліс і, тим самим, підвищити надійність і ресурс зубчастих передач.

Для досягнення мети роботи розроблені та виготовлені алмазно-абразивні інструменти, розроблені раціональної технології їх застосування (режими зубошліфування та правки), дослідження точності та шорсткості поверхонь зубчастих коліс після процесу обробки алмазно-абразивними інструментами. Дослідження виконувались в умовах промислового випробування на підприємстві АТ «Світло Шахтаря» (м. Харків).

Нами використовувались шліфувальні круги з монокристалічного електрокорунду (монокорунду та золь-гелевого корунду):

- 400×32×127 WG946 Hs12 VS – монокорунд;
- 400×32×127 3SG46Hs 12 VS – золь-гелевий корунд.

Порівняння експлуатаційних показників заданих кругів проводилось з кругами з білого корунду виробництва Волжського абразивного заводу 400×40×127 25AF46L6V.м Шліфування зубчастих коліс виконувалось на зубошліфувальному верстаті з ЧПК мод. HÖFLER RAPID 1250 (рис. 1).



Рис. 1 – Установка шліфувальних кругів WG946Hs12Vs (а) та 3SG46Hs12Vs (б) на зубошліфувальному верстаті з ЧПУ HÖFLER RAPID 1250

При випробуванні контролювали потужність зубошліфування та всі інші показники параметрів точності оброблених зубчастих коліс (табл. 1).

Наприклад, золь-гелевого круга 3SG46Hs12Vs проводили при шліфуванні двох зубчастих коліс одного і того ж типорозміру з наступними даними. Зовнішній діаметр  $d_a = 233,4$  мм; число зубів 29; модуль  $m = 7$ ; кут нахилу зубів  $\beta = -18^\circ$ ; зміщення  $x = 0,545$ ; ширина вінця  $B = 60$  мм. Припуск на обробку  $z = 0,510$  мм. Число етапів обробки – 3 (чорновий, напівчистовий, чистовий).

Таблиця 1 – потужність зубошліфування звичайним 25AF46L6V і золь-гелевим кругом 3SG46Hs12VS

Характеристика етапів зубошліфування	Шліфувальний круг	
	25AF46L6V (BA3)	3SG46Hs12VS (Best-Business a.s.) золь-гелевий
Етап 2 (правка через 6 западин)	$P_{сер} = 1811,15$ Вт Інтервал зміни $P$ 2411,15–600 Вт	$P_{сер} = 566,5$ Вт Інтервал зміни $P$ (1166,5 – 600) Вт
Етап 3 (правка через 10 западин)	$P_{сер} = 1333,30$ Вт Інтервал зміни $P$ 1933,3–600 Вт	$P_{сер} = 400$ Вт Інтервал зміни $P$ (1000 – 600) Вт

$P, P_{сер}$  – поточне і середнє значення потужності приводу шліфувального круга при потужності холостого ходу  $P_{xx} = 600$  Вт

## **Висновки**

1. Потужність шліфування на етапі 2 на 30,9% нижче у золь-гелевого круга 3SG46Hs12VS у порівнянні зі звичайним 25AF46L6V (ВАЗ). Потужність шліфування на етапі 3 у золь-гелевого круга (в порівнянні зі звичайним ВАЗ) на 72,5% нижче.

2. За результатами остаточного контролю похибки профілю і лінії зуба перевага в цілому після шліфування у золь-гелевого круга. Індивідуальна похибка кроку  $f_p$ , накопичена похибка кроку  $F_p$  по лівій і правій сторонах западин і радіальне биття  $F_r$  більше, ніж в 3 рази нижче після шліфування золь-гелю кругом в порівнянні зі звичайним кругом ВАЗ.

3. Шліфувальні круги з золь-гелевого корунду 3SG46Hs12VS можна рекомендувати для обробки зубчастих коліс, так як вони забезпечують зменшення потужності зубошліфування і кращі показники з точності обробки.

*Солових Є.К., Катеринич С.Є., Солових А.Є.,  
Дубовик В.О., Кіблик А.В. Центральноукраїнський  
національний технічний університет,  
Кропивницький, Україна*

## **ВІДНОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ТЕХНІКИ ЕЛЕКТРОДУГОВИМ НАПИЛЕННЯМ ЗНОСОСТІЙКИХ ПОКРИТТІВ**

Аналіз причин зносу деталей сільськогосподарської техніки та зокрема деталей типу «вал» показує, що в більшості випадків розмір робочих поверхонь деталей можливо відновити нанесенням зносостійких, корозійностійких та інших покриттів зі спеціальними властивостями. Інформаційні потоки свідчать, що існуюча технологія нанесення покриттів може дозволити не тільки відновлювати геометричні розміри деталей, а і забезпечити їх експлуатаційні властивості в процесі ремонту, та відповідно значно подовжити ресурс. Однак відсутність практичних рекомендацій з поверхневого зміцнення шляхом нанесення покриттів та обмежена інформація по властивостях отриманих покриттів викликають обґрунтовану недовіру конструкторів і технологів підприємств до відновлення і зміцнення деталей покриттями [1–3].

Найбільше розповсюдження серед відомих способів відновлення зношених поверхонь деталей сільськогосподарської техніки отримали різноманітні способи наплавлення, газотермічного напилення та гальванізації. Проте означені способи мають ряд недоліків, які обмежують область їх застосування [2–4].

Таким чином, одним з важливих напрямків у вдосконаленні технологій відновлення деталей сільськогосподарської техніки є науково-обґрунтований пошук прогресивних та менш витратних методів відновлення і підвищення їх надійності та довговічності.

При виборі способів відновлення необхідно враховувати наступні основні вимоги формування якісних покриттів: частка вмісту основного металу в покритті повинна бути близька до нуля; термічні впливи на деталь повинні повністю попереджати фазові або структурні зміни (перетворення) в основному металі; в зоні з'єднання не повинні виникати процеси релаксаційного характеру, що здатні змінити їх структуру і фазовий склад [5–7].

Згаданим умовам цілком відповідає саме метод електродугового напилення (ЕДН).

В останній час ЕДН знаходить все більш широке застосування і поступово витісняє традиційний газополуменевий метод. Це обумовлено багатьма перевагами цього методу: простотою і доступністю обладнання, що дозволяє наносити якісні покриття, не гірші за покриття, нанесенні плазмовим та детонаційним методами; більш високою тепловою ефективністю; високою продуктивністю (в 3–4 рази вище ніж при газополуменовому напиленні); отриманням покриттів з більшою міцністю щеплення з основним металом деталі, ніж при газополуменовому напиленні. Простота і легкість реалізації електродугового напилення також сприяють його широкому використанню. Це пов'язано з тим що, серед способів газотермічного напилення, він є самим дешевим та простим методом нанесення покриттів, який не потребує застосування дорогого обладнання та поєднує в собі технологічну гнучкість застосування, забезпечуючи при цьому зносостійкість відновлених деталей вище рівня нових [6–8].

Серед великої кількості сучасних розробок по ЕДН основний масив спрямований на активізацію процесу з використанням різноманітних пристроїв, методів і прийомів, найбільш доцільними з яких слід визнати інтенсифікацію теплообміну в системі «частинка-факел», що призводить до збільшення динамічних параметрів частинок і зменшення їх розмірів в процесі розпилення дротів, і найча-

стіше, забезпечується активацією розпилюючого потоку продуктами згоряння пропано-повітряної суміші [8–10].

Слід зазначити, що активація процесу ЕДН і підвищення, таким чином фізико-механічних та експлуатаційних характеристик відновлюваних поверхонь можливо досягати шляхом активації їх на кожному етапі багатоопераційної технології, а також застосуванням легованих сталевих дротяних матеріалів.

Запропонована технологія відновлення зовнішніх циліндричних поверхонь деталей сільськогосподарської техніки методом ЕДН покриттів, дозволяє, за рахунок активації процесу на різних етапах підготовки, нанесення зносостійкого покриття і його механо-термічної обробки, забезпечити суттєве підвищення їх функціональних властивостей та довговічності в умовах експлуатації.

### Література

1. Соловых, Е.К. Тенденции развития технологий поверхностного упрочнения в машиностроении / Е.К.Соловых. – Кировоград: КОД, 2012. – 91 с.

2. Башуров, Б.П. Трибологические отказы – фактор, определяющий функциональную надежность транспортных систем / Б.П. Башуров // Сб. докл. Международ. конгр. «Механика и трибология транспортных систем – 2003», Ростов на Дону, 10-13 сент.2003, Т.1. – Ростов на Дону: Изд-во Рост.гос.ун-та путей сообщ., 2003. – С. 72–74.

3. Полянский, А.С. Анализ и классификация показателей релентности средств транспорта / А.С. Полянский, Е.А. Дубинин, В.Н. Плетнев // Вісник ХНТУСГ ім.П.Василенка. Тракторна енергетика в рослинництві: Зб. наук. праць. – Харків : ХНТУСГ, 2007. – Вип.60. – С. 165–169.

4. Харламов, Ю.А. Основы технологии восстановления и упрочнения деталей машин / Ю.А.Харламов, И.А.Будагьянц. – Луганск : СУНУ им.В.Даля, 2009. – 976 с.

5. Балдаев, Л.Х. Перспективы применения газотермического напыления при ремонте и производстве оборудования в промышленности (ООО «ТСЗП») / Л.Х. Балдаев // Компрес.техн. и пневмат. – 2004. – №5. – С. 33–34.

6. Лопата, В.Н. Перспективы использования электродугового напыления при ремонте авиационной наземной техники / В.Н. Лопата, Ю.В.Брусило // Комплексне забезпечення якості технологіч-

них процесів і систем : Мат. VII міжнарод. наук.-практ. конф., 19-21 травня 2014 р., м. Чернігів. – Чернігів : ЧДТУ, 2014. – С. 164–167.

7. Витязь, П.А. Теория и практика нанесения защитных покрытий/ П.А. Витязь, В.С. Ивашко, А.Ф. Ильюшенко и др. – Мн. : Беларуская наука, 1998. – 583 с.

8. Соловых, Е.К. Восстановление распределительных валов автомобильных двигателей электродуговым напылением / Е.К. Соловых, Ю.В. Брусило, С.Е. Катеринич и др. // Modern question of productions and repair in industry and in transport : Mat. of the inter. Sci. and Tech. Seminar, February 10-16,2018, Brno, Czech Republic – Kyiv; Association of Machines-Building Technologists of Ukraine, 2018. – P. 20–25.

9. Брусило, В.А. Влияние факторов процесса электродугового напыления на структурообразование и свойства покрытий / Ю.В. Брусило, С.А. Довжук, Л.А.Лопата //Зб. наук. праць КНТУ «Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація». – Кіровоград: КНТУ, 2010 – Вип.23. – С. 287–297.

10. Белоцерковский, М.А. Технологические особенности и области использования гиперзвуковой металлизации /М.А. Белоцерковский, А.С.Прядко, А.Е. Черепко // Инновации в машиностроении : сб. науч. тр., 30–31 октября 2008 г., г. Минск. – Мн. : ОИМ НАН Беларуси, 2008 – С. 4–11.

## ЗМІСТ

<i>Акулович Л.М., Миранович А.В., Ворошуха О.Н.</i> УПРОЧНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ КОМПЛЕКСНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО И МАГНИТНОГО ПОЛЕЙ	3
<i>Акулович Л.М., Сергеев Л.Е., Атрощик М.Д.</i> ФОРМИРОВАНИЕ МИКРОРЕЛЬЕФА СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ	7
<u>Бондаренко В.П.</u> , <i>Матвійчук О.О., Євдокимова О.В., Шестаков С.І.</i> 3D-ТЕХНОЛОГІЯ ЗАГОТІВЕЛЬНОГО ТВЕРДОСПЛАВНОГО ВИРОБНИЦТВА	10
<i>Бондаренко Ю.К., Артюх К.О.</i> ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОБЛЕМИ УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ ПРИ РОЗВИТКУ СИСТЕМИ ОБСТЕЖЕННЯ ТА ТЕХНОЛОГІЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ВИРОБНИЦТВА ЗВАРНИХ КОНСТРУКЦІЙ З ЛЕГКИХ СПЛАВІВ	14
<i>Бурлаков В.І., Бурлакова Г.Ю.</i> УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ ШЛЯХОМ ВПРОВАДЖЕННЯ РІЗАЛЬНИХ ПЛАСТИН З НАДТВЕРДОЇ КЕРАМІКИ	17
<i>Бурькин В.В., Рыжов Ю.Э., Муковоз С.Ю.</i> ПРИМЕНЕНИЕ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕД ПРИ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКЕ ДЕТАЛЕЙ С ПОКРЫТИЯМИ	20
<i>Григор'єва Н.С., Гуменюк Л.О., Шабайкович В.А.</i> ПРОБЛЕМИ ВИРОБНИЦТВА ПІД ЧАС ПАНДЕМІЇ КОРОНАВІРУСА	26
<i>Ермишкин В.А., Минина Н.А., Соловьева Ю.Б., Палий Н.А.</i> СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ПРИ МАКРОСКОПИЧЕСКОМ И МИКРОСКОПИЧЕСКОМ АНАЛИЗЕ РАЗРУШЕНИЯ	31
<i>Зяхор И.В., Гуцин К.В., Самотрясов С.М., Завертанный М.С., Левчук А.Н.</i> ТЕХНОЛОГИЯ КОНТАКТНОЙ СТЫКОВОЙ СВАРКИ ОПЛАВЛЕНИЕМ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА 2219-T87	34
<i>Ільницька Г.Д., Лавріненко В.І., Смоквина В.В., Зайцева І.М., Загора А.П.</i> ПІДВИЩЕННЯ ОДНОРІДНОСТІ ЗА МІЦНІСТЮ ШЛІФПОРОШКІВ АЛМАЗУ, СИНТЕЗОВАНИХ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ФЕРОСПЛАВІВ	36

<i>Клименко С.А., Копейкіна М.Ю.</i> ДЕЯКІ ПЕРСПЕКТИВНІ НАПРЯМКИ ВДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ ОБРОБКИ РІЗАННЯМ	41
<i>Коморова Г.Л., Волошина Л.В., Цап О.І.</i> ПІДВИЩЕННЯ ТРИБОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЧАВУНУ КОМПЛЕКСНОЮ ОБРОБКОЮ	44
<i>Кривошеков В.Е.</i> СОВРЕМЕННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ОБСЛУЖИВАНИЯ (MAINTENANCE) МАШИН И СИСТЕМ	45
<i>Лавріненко В.І., Пасічний О.О., Бочечка О.О., Полторацький В.Г., Леценко О.В., Ситник Б.В., Кошкін О.М., Солод В.Ю., Гумаров О.В.</i> ВПЛИВ МОДИФІКУВАННЯ ПОВЕРХНІ ЗЕРЕН КОМПАКТИВ З МІКРОПОРОШКІВ КНБ ОКСИДАМИ ТА ХЛОРИДАМИ НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ПОКАЗНИКИ ШЛІФУВАЛЬНИХ КРУГІВ ПРИ ШЛІФУВАННІ ШВИДКОРІЗАЛЬНОЇ СТАЛІ	48
<i>Лавріненко В.І., Пасічний О.О., Полторацький В.Г., Солод В.Ю., Доброскок В.Л., Островерх Є.В.</i> ВПЛИВ МОДИФІКУВАННЯ ПОВЕРХНІ АЛМАЗІВ ОКСИДАМИ ТА ХЛОРИДАМИ НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ПОКАЗНИКИ ШЛІФУВАЛЬНИХ КРУГІВ ПРИ ШЛІФУВАННІ ТВЕРДОГО СПЛАВУ	51
<i>Лавріненко В.І., Пасічний О.О., Скрябін В.В., Бочечка О.О., Полторацький В.Г., Солод В.Ю., Кашинський І.С.</i> ВПЛИВ МОДИФІКУВАННЯ ПОВЕРХНІ ЗЕРЕН КУБІЧНОГО НІТРИДУ БОРУ ОКСИДАМИ ТА ХЛОРИДАМИ НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ПОКАЗНИКИ ШЛІФУВАЛЬНИХ КРУГІВ ПРИ ШЛІФУВАННІ ШВИДКОРІЗАЛЬНОЇ СТАЛІ	56
<i>Лавріненко В.І., Пасічний О.О., Скрябін В.О., Бочечка О.О., Полторацький В.Г., Солод В.Ю., Музичка Д.Г.</i> ВПЛИВ ХЛОРИДІВ, ПРИ МОДИФІКУВАННІ ПОВЕРХНІ ЗЕРЕН НТМ, НА ПОКАЗНИКИ ШОРСТКОСТІ ОБРОБЛЕНОЇ ПОВЕРХНІ ПРИ ШЛІФУВАННІ КРУГАМИ ІЗ ТАКИМИ ЗЕРНАМИ	60
<i>Лавріненко В.І., Пасічний О.О., Скрябін В.О., Полторацький В.Г., Кошкін О.М., Проц Л.А.</i> ВПЛИВ ФОРМОЗМІНИ РІЖУЧОЇ ПОВЕРХНІ ШЛІФУВАЛЬНОГО КРУГУ У КОЛОВОМУ НАПРЯМКУ ПРИ ШЛІФУВАННІ НА ЗМІНУ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ ОТРИМАНОЇ ШОРСТКОЇ ПОВЕРХНІ	64

<i>Лавріненко В.І., Скрябін В.В., Ільницька Г.Д., Петасюк Г.А., Ткач В.М., Солод В.Ю., Таницура Т.О.</i> ДО ВИБОРУ ЕФЕКТИВНОГО ЗВ'ЯЗУЮЧОГО ОДНОШАРОВОГО АЛМАЗНО-ГАЛЬВАНІЧНОГО ПОКРИТТЯ ДЛЯ ПРАВЛЯЧОГО ІНСТРУМЕНТУ	69
<i>Лещук І.В., Рябченко С.В., Сільченко Я.Л.</i> ВИКОРИСТАННЯ СПЕЦІАЛЬНИХ ШЛІФУВАЛЬНИХ АЛМАЗНИХ ТА КНБ КРУГІВ НА ВЕРСТАТАХ З ЧПК	74
<i>Майстренко А.Л., Олійник Н.О., Петасюк Г.А., Виноградова О.П., Ільницька Г.Д., Васильчук О.С., Базалій Г.А.</i> ВПЛИВ АБРАЗИВНОЇ СКЛАДОВОЇ КАМ НА ФОРМУВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ КРУПНОСТІ ШЛАМУ, ЯКИЙ ОТРИМУЮТЬ ПРИ ОБРОБЦІ ГІРСЬКОЇ ПОРОДИ	76
<i>Марініна Г.М., Степаненко С.М., Абакумова О.В., Єпіщенков В.В.</i> ЗАСТОСУВАННЯ SWOT-АНАЛІЗУ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ДІЛОВОГО СЕРЕДОВИЩА ЗГІДНО СТАНДАРТУ EN 9100:2018	78
<i>Мисько В.Г.</i> КАЧЕСТВО ПОКРЫТИЙ ПОСЛЕ МАГНИТНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО УПРОЧНЕНИЯ И ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ	83
<i>Михеев Р.С., Колмаков А.Г., Калашников И.Е., Кобелева Л.И., Быков П.А., Клименко С.А., Копейкина М.Ю., Хейфец М.Л.</i> ТЕХНОЛОГИЯ ФРИКЦИОННОЙ НАПЛАВКИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ СТАЛЕАЛЮМИНИЕВЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ГРАДИЕНТНЫХ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИЦИЙ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ И НА ТРАНСПОРТЕ	87
<i>Пащенко Є.О., Рябченко С.В., Федоренко В.Т.</i> ОБРОБКА СПЕЦІАЛЬНИХ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ КРУГАМИ З НТМ	91
<i>Посвятенко Е.К., Посвятенко Н.І., Аксьом П.А.</i> ПОЛІПШЕННЯ ОБРОБЛЮВАНОСТІ АУСТЕНІТНИХ СТАЛЕЙ ЗА РАХУНОК СТРУКТУРНИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ	93
<i>Просвірнин Д.В., Колмаков А.Г., Пивоварчик С.В., Пруцков М.Е., Клименко С.А., Копейкина М.Ю.</i> ВЛИЯНИЕ СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЁВ НА ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ТРИП-СТАЛИ ВНС9-Ш	96

<i>Ратуцкая Д.С., Хейфец И.М. Шкурко В.В.</i> ЦИФРОВИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ТРАДИЦИОННЫМИ И АДДИТИВНЫМИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМИ СИСТЕМАМИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ	99
<i>Севальнёва Т.Г., Колмаков А.Г. Севальнёв Г.С., Клименко С.А., Копейкина М.Ю., Хейфец М.Л.</i> ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПРОВОЛОКИ ИЗ СТАЛИ ВНС9-Ш В ПРОЦЕССЕ ХОЛОДНОГО ВОЛОЧЕНИЯ	103
<i>Сенють В.Т.</i> ВЛИЯНИЕ АТТРИТОРНОЙ И ТЕРМОБАРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТОК ВЮРЦИТНОГО НИТРИДА БОРА НА СТРУКТУРУ МАТЕРИАЛА НА ЕГО ОСНОВЕ	106
<i>Сенють В.Т., Витязь П.А., Валькович И.В., Хейфец М.Л., Колмаков А.Г.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАНОСТРУКТУРНОГО сVN НА МИКРОТВЕРДОСТЬ СПЕЧЕННОГО ПРИ ВЫСОКОМ ДАВЛЕНИИ ЖЕЛЕЗНОГО ПОРОШКА	110
<i>Сохань С.В., Сороченко В.Г.</i> ОБРОБЛЮВАНІСТЬ КУЛЬ ІЗ КЕРАМІКИ ПРИ АЛМАЗНО- АБРАЗИВНОМУ ШЛІФУВАННІ	113
<i>Сохань С.В., Сороченко В.Г., Возный В.В.</i> К ВОПРОСУ О ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ПРОЦЕССА АЛМАЗНО- АБРАЗИВНОЙ ДОВОДКИ КЕРАМИЧЕСКИХ ШАРОВ ПОДШИПНИКОВОГО НАЗНАЧЕНИЯ	116
<i>Тимофеева Л.А., Колесник М.А., Грибанов М.І.</i> ФОРМУВАННЯ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ НА ЧАВУННИХ ДЕТАЛЯХ ТРАНСПОРТНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ	119
<i>Тимофеева Л.А., Тимофеев С.С., Колесник М.А.</i> СУЧАСНІ ВИМОГИ ДО СПОСОБІВ ВІДНОВЛЕННЯ ЦИЛІНДРО- ПОРШНЕВОЇ ГРУПИ ТРАНСПОРТНИХ ДИЗЕЛІВ	121
<i>Харламов Ю.А.</i> ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ПОКРЫТИЙ И ИХ КЛАССИФИКАЦИЯ	123

<i>Хейфец М.Л., Колмаков А.Г., Просвирнин Д.В., Пивоварчик С.В., Пруцков М.Е., Клименко С.А., Копейкина М.Ю.</i>	
ПРИЧИНЫ И ПРОЦЕССЫ РАЗРУШЕНИЯ СТАЛЕЙ С TRIP/TWIP ЭФФЕКТОМ, ВОЗМОЖНОСТИ УЛУЧШЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ	128
<i>Шелковий О.М., Руднєв О.В., Гуцаленко Ю.Г.</i>	
ЕКОЛОГІЧНОЗБЕРІГАЮЧЕ ВИСОКОПРОДУКТИВНЕ АЛМАЗНО- ІСКРОВЕ ШЛІФУВАННЯ З ВВЕДЕННЯМ ТВЕРДИХ МАСТИЛ	130
<i>Кучук-Яценко С.І., Зяхор І.В., Завертанний М.С., Наконечний А.О.</i>	
ЗВАРЮВАННЯ ТИСКОМ АЛЮМІНІДУ ТИТАНУ І СТАЛІ 40Х9С2 ДЛЯ БІМЕТАЛЕВИХ КЛАПАНІВ АВТОМОБІЛЬНИХ ДВИГУНІВ	134
<i>Павлова Г.О., Косач Н.І.</i>	
УПРАВЛІННЯ ЖИТТЄВИМ ЦИКЛОМ ПРОДУКЦІЇ У СИСТЕМІ ЯКОСТІ НА ПІДПРИЄМСТВАХ АВІАЦІЙНОЇ ГАЛУЗІ	136
<i>Нежебовський В.В., Рябченко С.В.</i>	
ПРОФІЛЬНЕ ШЛІФУВАННЯ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС ВУГЛЕВИДОБУВНИХ КОМБАЙНІВ	139
<i>Солових Є.К., Катеринич С.Є., Солових А.Є., Дубовик В.О., Кіблик А.В.</i>	
ВІДНОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ТЕХНІКИ ЕЛЕКТРОДУГОВИМ НАПИЛЕННЯМ ЗНОСОСТІЙКИХ ПОКРИТТІВ	141

# СУЧАСНІ ПИТАННЯ ВИРОБНИЦТВА ТА РЕМОНТУ В ПРОМИСЛОВОСТІ І НА ТРАНСПОРТІ

Матеріали Міжнародного науково-технічного семінару,  
15–19 березня 2021 р., м. Львів

*(Мови семінару: українська, англійська, російська)*

Комп'ютерна верстка  
Копейкіна М.Ю.

Підписано до друку 17.02.2021  
Формат 60×84×1/16. Папір типографський  
Друк офсетний. Умч. вид. арк. 11,0.  
Тираж 150 прим.

Асоціація технологів-машинобудівників України  
04074, м. Київ, вул. Автозаводська, 2