

УДК 621.923

Ю.Г. Гуцаленко, В.В. Івкін, О.К. Севидова, канд. техн. наук,
І.І. Степанова, канд. техн. наук Харків, Україна

ІНСТРУМЕНТИ З НАДТВЕРДИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ АЛМАЗНО-ІСКРОВОГО ШЛІФУВАННЯ НА УНІВЕРСАЛЬНИХ ВЕРСТАТАХ

У статті представлена виконана в НТУ «ХПІ» розробка локальних електроізоляційних захисних покриттів інструмента технологій продуктивної обробки з введенням в зону різання енергії електричних розрядів для підтримки працездатності шліфувальних кругів з алмазно-металевої композицією робочої частини. Розробка є альтернативою електроізоляційної модернізації шпиндельних вузлів універсальних шліфувальних верстатів. Наводяться відомості про особливості практичної реалізації, конструкторсько-технологічні характеристики і патентний захист розробки.

Ключові слова: електроізоляційні захисних покриття, зона різання

В статье представлена выполненная в НТУ «ХПИ» разработка локальных электроизоляционных защитных покрытий инструмента технологий производительной обработки с введением в зону резания энергии электрических разрядов для поддержки работоспособности шлифовальных кругов с алмазно-металлической композицией рабочей части. Разработка является альтернативой электроизоляционной модернизации шпиндельных узлов универсальных шлифовальных станков. Приводятся сведения об особенностях практической реализации, конструкторско-технологических характеристиках и патентной защите разработки.

Ключевые слова: электроизоляционные защитные покрытия, зона резания

The article presents made in NTU "KPI" the development of local electrically insulating coatings for tool of the technologies of high-efficient processing with the introduction the energy of electrical discharges into the cutting zone to maintain a working capacity of grinding wheels with diamond-metal composition of the working part. Development is an alternative to the electrical insulation upgrade of spindle units of universal grinding machines. Information about the features of practical implementation, design and technological characteristics and patent protection of development is given.

Keywords: electrically insulating coatings, working capacity

Вступ. Місце розробки у науково-дослідницькому просторі. Одним з найбільш високотехнологічних методів формоутворення важкооброблюваних матеріалів, в тому числі новітніх надвисокотвердих наноструктурних (М. Д. Узунян та ін., 2015 [1]), є створене в НТУ «ХПІ» алмазно-іскрове шліфування (АІШ). Однак для його реалізації на універсальному обладнанні дотепер виконується спеціальна модернізація з призупиненням експлуатації верстата і переділом відповідального за його точність шпиндельного вузла.

Серед сучасно виділених в науковій школі фізики процесів різання НТУ «ХПІ» пріоритетних для поглиблених досліджень та розробок світових тенденцій удосконалення алмазно-абразивних інструментів (ААІ) [2] є створення ААІ із спеціальною адаптацією конструкції до експлуатації у високопродуктивних комбінованих технологіях з введенням електричної

енергії в зону різання та можливістью гнучкого впливу на стан ріжучого рельєфу за рахунок її дозування без струмозахисного переділу відповідального за точність обробки шпиндельного вузла верстату. Деякий попередній, сумісний з ІПМаш НАН України досвід у цьому напрямі стосується реалізації конвенціональних ААІ у складі спеціальних багатомісних інструментальних вузлів, а саме планетарних, з регулюванням кута нахилу поверхні різання та подвійним параметричним регулюванням її швидкості відносно оброблюваної поверхні [3, 4].

Визначимо місце у вітчизняному і світовому науковому просторі предствленої розробки, що присвячено втіленню ідеї вибіркового діелектричного захисту конвенціональних шліфувальних кругів для спрощеної організації комбінованих електричними ефектами процесів обробки ними на універсальних шліфувальних верстатах відповідно до НДР «Розробка конструкційно-технологічних основ і технічних рішень алмазних інструментів підвищеної функціональності в реалізації електрофізикохімічних методів шліфування» (№ держ. реєстрації 0109U007406) за проектом ID 64244 від 26.08.2016 р. і планом наукових досліджень і розробок закладів Міністерства науки і освіти України з фінансуванням із державного бюджету у 2017-2018 рр.

Вченими Інституту надтвердих матеріалів НАН України (М. В. Новіков та ін., 2014 [5]) шліфувальні круги для комбінованих методів обробки в національній систематизації та рекомендаційній практиці інструментів з надтвердих матеріалів виділяються в окремий розгляд, однак індиферентні наявності струмозахисту шпиндельного вузла шліфувального верстата від корпусу конструкції інструменту в цих розглядах, як і зарубіжних, відсутні.

У провідних наукових школах економічно розвинених країн (США, Великобританія, Німеччина, Франція, Канада, Китай та ін.), і в Україні також, останніми роками спостерігається значна активізація розробок багатофункціональних покриттів, в тому числі з діелектричними властивостями. При виконанні розробки як альтернатива і можливе доповнення розвитку власних напрацювань зокрема розглядався досвід формування порошкового покриття Al_2O_3 на сталі (М. G. Kovaleva та ін., Росія, 2014 [6]), потенційно уніфікуючий вибір електроізоляційного матеріалу для струмозахисту алюмінієвих і сталевих корпусів алмазних шліфувальних кругів. У практичному використанні триоксиду алюмінію, який має високу зносостійкість, виділяється низькоартісний рівень інновації (Т. Feng та ін., Китай-Німеччина, 2016 [7]), особливо характерний для енергоефективних низькотемпературних технологій формування захисних покриттів, зокрема анодно-іскрових (АІП), до яких відноситься й базисний за розробкою метод мікродугового оксидування (МДО). Актуальними в розгляді до посадки, кріплення і умов експлуатації розроблюваних інструментів є дослідження ковзання алюмооксидних покриттів (J. M. Shockley та ін., Канада-Франція,

2014 [8]), а також еволюції їх властивостей в експлуатаційний період життєвого циклу також з циклічним теплофізичним впливом, але в інших застосуваннях (М. В. Nezhad-Nobijari та ін., Іран, 2016 [9]).

У найближчій ретроспективі актуальним щодо виконуваної розробки дослідженням і оптимізації технологій МДО присвячені праці вчених України, Білорусі, Польщі (О. Д. Погребняк та ін., 2012 [10]), Канади (V. Dehnavi та ін., 2014 [11]), Франції (J. Martin та ін., 2015 [12]), Росії і Великобританії (E. V. Parfenov та ін., 2015 [13]).

У відомих підходах з адаптації до АІШ технічних систем шліфування ААІ як об'єкт бар'єрних технічних рішень, що забезпечують відсутність електричної провідності його контакту з посадковим місцем інструментального шпінделю верстата, до анонсованого авторським вітчизняним патентом на корисну модель [14] і першої з міждержавним представництвом роботи [15], ні в Україні, ні за її межами не розглядався ні в дослідницькій, ні у виробничій практиці.

Метою статті є узагальнення власного досвіду конструкторсько-технологічних розробок у визначеному напрямі удосконалення ААІ відносно широко поширеної практики ААІ з алюмінієвими корпусами на тлі передових вітчизняних та зарубіжних досягнень, зокрема з використання сучасного методу МДО, на теоретично та експериментально обґрунтованому використанні якого побудовано наукову концепцію необхідного та достатнього електроізоляційного покриття поверхонь інструменту, які є посадковими з його розміщення та закріплення у робочому положенні на інструментальній бабці верстату, та визначення на цієї основі подальших досліджень в цьому ж напрямі з позицій підсилення конкурентоспроможності на вітчизняному та світовому техніко-технологічних ринках.

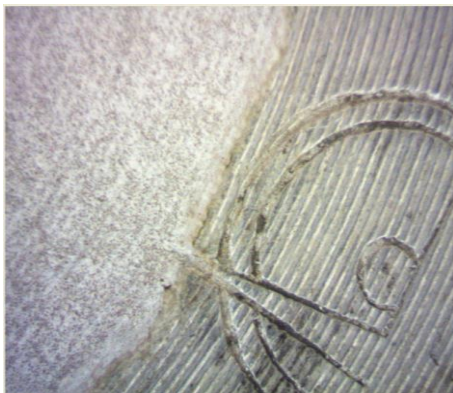
Конструктивно-технологічні рішення інструментів. Інверсія завдання електроізоляції корпусу алмазного шліфувального круга, сталевого або алюмінієвого, від установочних поверхонь інструментального шпинделя інноваційним рішенням інструменту може бути вирішена з використанням універсальних діелектричних покриттів металевих поверхонь, наприклад, на епоксидній основі, в тому числі підвищеної зносостійкості завдяки включенню в епоксидну матрицю діелектричного порошку триоксиду алюмінію [16], досвід успішного застосування яких в організації верстатостроительних технологій з введенням в зону обробки додаткової енергії електричних розрядів відомий і по експериментальної дослідницької, і по модернізаційної промисловій практиці.

Розглянутий підхід реалізується електроізоляційною поверхневою інженерією установчо-контактних поверхонь корпусу інструменту, тобто у загальному випадку повного вирішення завдання – циліндричної посадкового отвору і прилеглих до неї торцевих, з перекриттям зон контакту за ними в радіальних напрямках. Наприклад, при позиціонуванні інструменту на

заточувальних верстатах, обмежених радіальними габаритами шліфувальної оправки (по опорному буртику) і кріпильного нарізного фланця, що сопрягається з нею з робочою боку (рис. 1, а). При цьому струмопідвід на робочу поверхню інструменту може здійснюватися за допомогою звичайного щіткового контакту через вільні від електроізоляційного покриття поверхні його металевого корпусу або безпосередньо алмазно-металева композицію робочої частини шліфувального круга.



а



б

Рисунок 1 – Зразки алмазних шліфувальних кругів з електроізоляційним покриттям установочної контактної поверхні методом МДО:

а) на оправці заточувального шліфувального верстату мод. ЗД642Е;

б) фрагмент алюмінієвого корпусу під мікроскопом МБС-9, зона покриття зліва (x 10)

У загальній традиційній практиці виготовлення токопроводних корпусів ААІ застосовують алюміній (прокат і лиття) і сталі (конструкційні і леговані). При цьому за експлуатаційними масо-динамічними перевагами алюмінієвий вибір домінує. У вітчизняних алюмінієвих технологіях корпусів ААІ найбільш поширене застосування сплаву АК6 (або 1360) по ГОСТ 4784-97.

Це відповідає і сучасній практиці ПАТ «Полтавський алмазний інструмент» – національного лідера у виробництві ААІ, яким крім АК6 в корпусах шліфувальних кругів застосовуються також алюмінієві сплави А8, АК5М2 і інші, що в тому числі мають стандартні закордонні аналоги в США, Японії, Великобританії, Франції, Італії, Польщі, Чехії, а також в інших країнах і в Євросоюзі в цілому. Наявність численних зарубіжних аналогів сплаву АК6 свідчить про патентно-ліцензійну перспективність інноваційних розробок пов'язаних з ним технологій функціональних покриттів.

Оксидні покриття на алюмінієвому сплаві АК6 формували в алюмінатному електроліті при напрузі 250-300 В. Товщина покриттів по поверхні становила 100 ... 120 мкм.

Після анодування зразки піддавали кип'ятінню в дистильованій воді протягом 30 хвилин з метою зменшення відкритої пористості за рахунок гідратації оксидної плівки.

За результатами тераометричних вимірювань встановлено, що питомий електричний опір сформованого покриття (рис. 1, б) склав приблизно $1,2 \cdot 10^{12}$ Ом·м, а пробивна напруга – понад 1000 В (в режимі випробувань з навантаженням електроізоляційного шару, що випробується, із застосуванням напруги до 1 кВ пробую не спостерігається).

У технологічному маршруті виготовлення алмазних шліфувальних кругів операція вибіркового анодного оксидування корпусу повинна виконуватися до напесовки на нього алмазозносного шару, щоб забезпечити цей шар від передчасних електрофізикохімічних пошкоджень. Для бездефектної модернізації традиційних алмазних чашкових кругів в умовах споживача у час занурення в ємність оксидування запропоновано використовувати спеціальну оснастку (рис. 2), що виключає алмазно-металеву композицію робочої частини шліфувального круга з електричного ланцюга МДО.



а



б

Рисунок 2 – Чашковий алмазний шліфувальний круг у зборі зі спеціальною оснасткою для вибіркового формування покриття на його металевому корпусі методом МДО (без периферійного замикання чохлам зі спеціальної гуми):

а) вид спереду; б) вид збоку

Основним недоліком покриття методом МДО як електроізоляційного є погіршення його діелектричних властивостей з часом, особливо при витримці

у вологому повітрі. Аналогічне середовище може виникати також в умовах шліфування з використанням охолоджуюче-мастильних рідин. Зниження рівня діелектричного захисту відбувається через пористість покриття і його насичення парами води або розчином електроліту. На жаль, отримати такі покриття абсолютно без пір неможливо, оскільки це обумовлено сутністю самого процесу МДО, але можна мінімізувати їх кількість за рахунок оптимізації технологічних параметрів.

Більш радикальний ефект досяжний при обробці поверхні покриттів після операції МДО полімерними матеріалами. Встановлено, що насичення поверхневої пористості композицією на основі вінілхлориду з низькою в'язкістю дозволяє в кілька разів підвищити характеристики діелектричного захисту і їх стійкість у вологому середовищі. Спосіб запатентований [17].

Експлуатаційні питання розмірного ефекту МДО. Основу відомого ефекту зміни розміру в напрямку формування АПП забезпечує захоплення атомів іонізованого в хімічно активний озон кисню вентильним металом поверхневого шару об'єкта МДО [18]. Відповідно до стехіометричній трансформації металу поверхні об'єкта МДО в оксидну структуру це теоретично передбачуваний ріст. Однак різна експериментальна практика, передня і власна, показує, що розрахунки, які базуються тільки на стехіометрії, лише відображають тенденцію, але не є достатніми для адекватних прогнозів лінійного приросту матеріалу з АПП в напрямку його формування у порівнянні з вихідним станом.

Світова практика АПП методом МДО різних вентильних металів та сплавів на їх основі зазвичай використовує зносостійкі, корозійностійкі і теплостійкі властивості АПП, що дозволяє підвищити відповідні експлуатаційні показники в 1,5-2,5 рази. Застосування АПП як діелектричних відомо і досліджено у значно меншій мірі. Тем не менш в застосуванні МДО до алюмінієвих матеріалів можна отримати захисні АПП товщиною до 400 мкм, які мають не тільки мікротвердість до 25 ГПа і зносостійкість на рівні твердих сплавів, але поряд з тепловим ударом до 2500 °С витримують ще й електричну напругу до 6000 В [19] при діелектричних параметрах таких АПП, близьких до діелектриків вищої якості, причому можливим формуванням методом МДО в різних електролітах [20, 21].

Механічна обробка високотвердих корундових АПП для отримання потрібного розміру з необхідною точністю не складає особливих труднощів у застосуваннях лезових або абразивних інструментів з надтвердих матеріалів. Однак, якщо зниження деякої розрахункової товщини АПП зі службовою функцією забезпечення, наприклад, зносостійкості принципово не перешкоджає працездатності деталі, хоча і знижує ресурс зносостійкої експлуатації підданої МДО поверхні, то в завданнях струмозахисту проведення такого зниження слід розглядати з позицій ризику доексплуатаційного вибракування деталі технічним контролем.

Відомий сторонній і власний експериментальний досвід стосовно алюмінієвим і титанових сплавів свідчить про суттєвий вплив на кінцевий розмірний ефект МДО не тільки електричних параметрів, часу та інших технологічних умов організації протікання процесу, особливо складу електроліту, а й марочного хімічного складу і відповідності йому об'єкта МДО, заготівельної технології та вихідної щільності останнього.

Дослідження розмірного ефекту МДО проведені стосовно характерним представникам сучасно використовуваних вітчизняною інструментальною промисловістю у виробництві корпусів алмазних шліфувальних кругів алюмінієвих сплавів Д16Т і АК6 в умовах використання джерел змінного електричного струму і з квазілінійною характеристикою струму, формування АП в типових розчинах лугу, рідкого скла та їх комбінацій.

В необхідних випадках сформоване покриття механічно обробляється для доведення посадкового отвору шліфувального круга до потрібного розміру і заданої точності. Перед операцією модернізації шліфувального круга за методом МДО альтернативно тонкої доводочної післяопераційної механічної обробки може бути виконана попередня розшліфовка його посадкового отвору з урахуванням поверхневого збільшення вихідного тіла з алюмінієвої основою в окисдованому обсязі і відповідного змінення (збільшення) його лінійної розмірної характеристики у напрямку товщини оксидного покриття. Приймаючи до уваги результати також проведених в НТУ «ХП» досліджень [22], при цьому орієнтовно можна виходити з середнього очікування лінійного приросту розміру на 20-25% від товщини алюмінієвої основи, яка прореагувала.

Більш точні розрахунки потребують розробки на базі експериментальних досліджень прогностичних моделей розмірного ефекту МДО.

Прогнозування розмірного результату операції МДО, остаточної або з подальшою доводочною розмірною обробкою, важливо при її виконанні на поверхнях робочих сполучень, посадкових в роз'ємних або в нероз'ємних складальних з'єднаннях, як це має місце в технічних рішеннях алмазних шліфувальних кругів з локальним струмозахистом корпусу для їх розширеної адаптації до алмазно-іскрового шліфування, котрі розроблено в НТУ «ХП» на базі корпусних конструкцій відповідно конвенційного універсального типу [14] і спеціальної, виконаної згідно з японським прототипом заодно зі шківом робочого приводу [23].

Висновки і перспективи досліджень та практики. Виконання проекту НДР ID 64244 від 26.08.2016 р. створює наукове та конструкторсько-технологічне забезпечення підвищення функціональності ААІ (шліфувальних кругів) із можливістю ведення обробки ними з одночасною ініціацією електричних ефектів в зоні різання на універсальних верстатах без спеціальної модернізації шпindelних вузлів таких верстатів.

Найближчі перспективи продовження розробки в основному окреслені проектом ID 64244 від 26.08.2016 р. і полягають у наступних кроках:

- визначення факторів впливу та отримання відповіді на прогностичні виклики розмірного ефекту МДО контактних поверхонь в задачах технології машинобудування шляхом аналітичних описів збільшення лінійних розмірів алюмінієвих тіл з типових марочних представників в напрямку поверхневого формування корундового триоксиду при МДО;
- розробка пропозицій виробництва алмазних шліфувальних кругів щодо організації технологічного маршруту їх виготовлення з розширенням функціональності за рахунок можливості ведення обробки ними з одночасною ініціацією електричних ефектів в зоні різання на універсальних верстатах без спеціальної модернізації шпindelних вузлів таких верстатів;
- розробка пропозицій механообробним підприємствам щодо організаційно-технічних заходів та науково-практичних методичних рекомендацій з формування вибіркового діелектричного покриття для розширення функціональності конвенціональних алмазних шліфувальних кругів;
- розробка дослідно-промислових прототипів та технологічної інструкції щодо експлуатаційної реалізації алмазних шліфувальних кругів з вибірковою електроізоляцією спеціальними покриттями на базі продукції або в умовах вітчизняних виробників алмазного інструменту для формоутворення плоских та круглих поверхонь периферією і торцем інструментів з одночасною ініціацією електричних ефектів в зоні різання на універсальних верстатах без спеціальної модернізації шпindelних вузлів таких верстатів.

Відповідно очікуванню машинобудівної промисловості за відгуком на виконуваний проект ID 64244 від 26.08.2016 р. ПАТ ХМЗ «Світло Шахтаря» та з погляду на плановий обсяг дворічного фінансування його виконання (1650,0 тис. грн.), для досягнення, наприклад, річного терміну окупності цих витрат достатньо хоча б одномісного, тобто на одному універсальному верстаті, використання запропонованого розширення технологічних можливостей на 80-85 підприємствах, що менш ніж в угрупованні з 94-х підприємств за переліком об'єктів державної власності, що є стратегічно значущими для економіки і безпеки держави згідно постанови Кабінету Міністрів України від 4 березня 2015 р. № 83, та працюють у найбільш пріоритетних для впроваджувального просування даної розробки оборонної, машинобудівної, авіаційної та ракетно-космічної сферах промисловості.

Результати розробки конструкційно-технологічних основ інструментів підвищеної функціональності за проектом очікувано дадуть можливість розвинути системологічну структуру інструментального виробництва в сегменті ААІ, оскільки в них проявив зацікавленість і основний виробник алмазних шліфувальних кругів в Україні ПАТ «Полтавський алмазний інструмент».

За передпроектною прогновною оцінкою ефективності застосування результатів представленої тут НДР від ІНМ ім. В. М. Бакуля НАН України, завдяки переважній орієнтації на безводні операції шліфування, в тому числі з сухим мастилом, тим самим наощадливість водних ресурсів, вони відповідатимуть світовій тенденції створення та експлуатації технологій підвищеної екологічності та мають експортну перспективу.

Подальше життя представленої розробки зумовлено насамперед нев'яучою конкурентоспроможністю методу АПШ та відповідною мотивацією маловитратного розширення технологічних можливостей існуючих верстатострументальних систем, у тому числі морально застарілих, з перетворенням їх у високоефективні.

Список использованных источников: 1. *Узунян, М. Д.* Шлифование наноструктурных твердых сплавов / *М. Д. Узунян, Р. М. Стрельчук.* – Харьков : НТУ ХПИ, 2015. –182 с. 2. *Грабченко, А.* Розробка техніко-технологічних рішень і дослідних зразків елементів системи «верстат-оснастка-інструмент» плоского торцевого шліфування важкооброблюваних матеріалів : Звіт про НДР (заключн.) [№ держ. реєстрації 0115U000524; інв. № 0217U001289] / *А. Грабченко, Ю. Гуцаленко, І. Пижов та ін.; кер. А. Грабченко.* – Х.: Нац. техн. ун-т "Харк. політехн. ін-т", 2016. – 380 с. 3. *Грабченко, А.* Розроблення та впровадження у виробництво дослідно-промислових зразків планетарних інструментів та високоєфективних технологій алмазного шліфування важкооброблювальних матеріалів : Звіт про НДР (заклучн.) [№ держ. реєстрації 0109U007406; інв. № 0210U007380] / *А. Грабченко, В. Федорович, І. Пижов та ін.; кер. А. Грабченко.* – Х.: Нац. техн. ун-т "Харк. політехн. ін-т", 2010. – 278 с. 4. *Гуцаленко, Ю. Г.* Доцільність і особливості організації торцевого планетарного шліфування у електрофізикохімічних технологіях / *Ю. Г. Гуцаленко* // Вісн. Харк. нац. техн. ун-ту сіл. госп-ва. – 2010. – Вип.106 : Техн. сервіс АПК, техніка та технології у с.-г. машинобудуванні. – С. 134-140. 5. *Богатырева, Г. П.* Инструменты из сверхтвёрдых материалов / *Г. П. Богатырева, В. В. Бурыкин, В. В. Гаргин* и др.; под. ред. *Н. В. Новикова* и *С. А. Клименко.* – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2014. – 608 с. 6. *Kovaleva, M. G.* Structure and properties of an Al₂O₃ powder coating formed by a cumulative detonation method / *M. G. Kovaleva, M. S. Prozorova, M. Yu. Arseenko, Yu. N. Tyurin, and O. V. Kolisnichenko* // Russian Metallurgy (Metally) [ISSN : 0036-0295 (Print) 1555-6255 (Online)]. – Vol. 2014 (2014). – Iss. 4. – PP. 275-278. – doi:10.1134/S0036029514040053. Перевод. Оригінал. текст на рус. яз.: Деформация и разрушение материалов [ISSN 1814-4632], 2012, Вып. 12, с. 9–12. 7. *Feng, T.* Low-Cost Al₂O₃ Coating Layer As a Preformed SEI on Natural Graphite Powder To Improve Coulombic Efficiency and High-Rate Cycling Stability of Lithium-Ion Batteries / *T. Feng, Y. Xu, Z. Zhang, X. Du, X. Sun, L. Xiong, R. Rodriguez, and R. Holze* // ACS Appl. Mater. Interfaces. – Vol. 8 (2016), Iss. 10, pp. 6512–6519. 8. *Shockley, J. M.* Third Body Behavior During Dry Sliding of Cold-Sprayed Al-Al₂O₃ Composites: In Situ Tribometry and Microanalysis / *J. M. Shockley, S. Descartes, E. Irissou, J.-G. Legoux, and R. R. Chromik* // Tribology Letters. – Vol. 54 (2014), pp. 191-206. 9. *Nezhad-Nobijari, M. B.* Evaluation of the aluminate coating on cleaned internal passages of used gas turbine blades / *M. B. Nezhad-Nobijari, M. Isakhani-Zakaria, and A. Bakhshi* // Surface & Coatings Technology. – Vol. 289 (2016), pp. 206-212. 10. *Pogrebnyak, A. D.* Structure, Properties and Element Composition of Alumina Coatings, Obtained by Micro-Arc / *A. D. Pogrebnyak, O. V. Sobol, F. F. Komarov, A. Sh. Kaverina, Yu. N. Tyurin, I. V. Yakuschenko, A. A. Drozdenko, and J. Partyka* // Proceedings of the International Conference “Nanomaterials: Applications and Properties” (2012). – Vol. 1, No. 2, 02NFC32: 3 p. 11. *Dehnavi, V.* Phase transformation in plasma electrolytic oxidation coatings on 6061 aluminum alloys / *V. Dehnavi, X. Y. Liu, B. Luan, D. W. Shoosmith, and S. Rohani* // Surface & Coatings Technology. – Vol. 251 (2014), pp. 106-114. 12. *Martin, J.* Influence of electrolyte ageing on the Plasma Electrolytic Oxidation of aluminium / *J. Martin, P. Leone, A. Nominé, D. Veys-Renaux, G. Henrion, and T. Belmonte* // Surface and Coatings Technology. – Vol. 269 [Special Issue

on Plasma Electrolysis : Progress in Science, Technology and Applications of Electrolytic Plasma Surface Treatments and Coatings] (2015), pp. 36-46. **13.** *Parfenov, E. V.* Towards smart electrolytic plasma technologies : An overview of methodological approaches to process modeling / *E. V. Parfenov, A. Yerokhin, R. R. Nevyantseva, M. V. Gorbakov, C.-J. Liang, and A. Matthews* // Surface and Coatings Technology. – Vol. 269 [Special Issue on Plasma Electrolysis : Progress in Science, Technology and Applications of Electrolytic Plasma Surface Treatments and Coatings] (2015), pp. 2-22. **14.** *Гуцаленко, Ю. Г.* Шліфувальний круг : патент на корисну модель № 96568 Україна: МПК (2006.01) B24D 3/06 / *Ю. Г. Гуцаленко, О. К. Севидова, І. І. Степанова*; власник : Нац. техн. ун-т «Харк. політехн. ін-т». – № u 201409394; заявл. 26.08.2014; опубл. 10.02.2015. Бюл. № 3. **15.** *Гуцаленко, Ю. Г.* Современные подходы к организации и реализации технических систем и технологий алмазно-искрового шлифования / *Ю. Г. Гуцаленко, К. Янку* // Физические и компьютерные технологии : Тр. 21-й междунар. науч.-практ. конф. 24-25 дек. 2015 г., г. Харьков. – Днепропетровск : Изд-во «Лира», 2015. – С. 29-38. **16.** *Гуцаленко, Ю. Г.* Композиція для електроізоляційних зносостійких покриттів : патент на корисну модель № 92786 Україна : МПК C08L 63/02 (2006.01), C08J 5/16 (2006.01) / *Ю. Г. Гуцаленко, В. В. Івкін, О. В. Руднев, О. К. Севидова*; власник : Нац. техн. ун-т «Харк. політехн. ін-т». – № u 201315441; заявл. 30.12.2013; опубл. 10.09.2014. Бюл. № 17. **17.** *Севидова, О. К.* Спосіб формування зносостійких електроізоляційних покриттів на сплавах алюмінію та титану : патент на корисну модель № 111473 Україна : МПК (2016.01) C25D 11/00, C25D 11/04 (2006.01), C25D 3/54 (2006.01) / *О. К. Севидова, І. І. Степанова, Ю. Г. Гуцаленко, К. М. Алексеев*; власник : Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – № u 2016 05063; заявл. 06.05.2016; опубл. 10.11.2016. Бюл. № 21. **18.** *Суминов, И. В.* Микродуговое оксидирование (теория, технология, оборудование) / *И. В. Суминов, А. В. Эпельфельд, В. Б. Людиг* [и др.]. – М. : ЭКОМЕТ, 2005. – 368 с. **19.** *Эпельфельд, А. В.* Применение технологии микродугового оксидирования для формирования защитных покрытий / *А. В. Эпельфельд* // Технология машиностроения. – 2004. – № 4. – С. 39-44. **20.** *Павлюс, С. Г.* Диэлектрические свойства анодно-искровых силикатных покрытий на алюминии / *С. Г. Павлюс, В. И. Соборницкий, Ю. А. Шенрут* [и др.] // Электронная обработка материалов. – 1987. – № 3. – С. 34-36. **21.** *Баковец, В. В.* Оксидные пленки, полученные обработкой алюминиевых сплавов в концентрированной серной кислоте в анодно-искровом режиме / *В. В. Баковец, И. П. Долговесова, Г. Л. Никифорова* // Защита металлов. – Т. 22 (1986). – № 3. – С. 440-444. **22.** *Белозеров, В. В.* Исследование изменения размеров детали при МДО-обработке алюминиевых сплавов / *В. В. Белозеров, А. И. Махатилова, Е. М. Реброва* // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: матеріали XVII міжнар. наук.-практ. конф. (20-22 травня 2009 р., Харків). – У 2-х ч. – Х. : НТУ «ХПІ», 2009. – Ч. 1. – С. 326. **23.** *Гуцаленко, Ю. Г.* Шліфувальний круг : патент на корисну модель № 117767 Україна: МПК (2006.01) B24D 5/16 / *Ю. Г. Гуцаленко, О. К. Севидова, В. В. Білозеров, Г. І. Махатилова*; власник : Нац. техн. ун-т «Харк. політехн. ін-т». – № u 2017 00074; заявл. 03.01.2017; опубл. 10.07.2017. Бюл. № 13.

Bibliography (transliterated): **1.** *Uzunyan, M. D., and R. M. Strelchuk.* *Shlifovanie nanostrukturyh tverdyh splavov.* Kharkov, NTU “KhPI”, 2015. 182 p. Print. **2.** *Grabchenko, A., et al.* *Rozrobka tehniko-tehnologichnyh rishen i doslidnyh zrazkyv elementiv systemy «verstat-osnastka-instrument» ploskogo tortsevoogo shlifuvannya vazhkoobroblyuvanyh materialiv. Zvit pro NDR (zaklyuchn.).* No. derzh. reestratsiyi 0115U000524. Inv. No. 0217U001289. Nat. Tech. Univ. "Kharkov Polytechnic Inst.". Kharkov, 2016. 380 p. Print. **3.** *Grabchenko, A., et al.* *Rozroblyennya ta vprovadzhennya u virobnytstvo doslidno-promislovyh zrazkyv planetarnykh instrumentiv ta visokoeffektivnyh tehnologiy almaznogo shlifuvannya vazhkoobroblyuvanykh materialiv. Zvit pro NDR (zaklyuchn.).* No. derzh. reestratsiyi 0109U007406. Inv. No. 0210U007380. Nat. Tech. Univ. "Kharkov Polytechnic Inst.". Kharkov, 2010. 278 p. Print. **4.** *Gutsalenko, Yu. G.* "Dotsilnist i osoblivosti organizatsiyi tortsevoogo planetarnogo shlifuvannya u elektrofizikohimichnykh tehnologiyah". *Visn. Khark. nats. tehn. un-tu sil. gosp-va.* 2010. No.106. 134-140. Print. **5.** *Bogatyireva, G. P., et al.* *Instrumenty iz sverhtvyordykh materialov.* Ed. N. V. Novikov and S. A. Klimenko. Moscow: Mashinostroenie, 2014. 608 p. Print. **6.** *Kovaleva, M. G., et al.* "Structure and properties of an Al₂O₃ powder coating formed by a cumulative detonation method".

Russian Metallurgy (Metally). Vol. 2014 (2014). Iss. 4. 275-278. Print. **7.** Feng, T., et al. "Low-Cost Al₂O₃ Coating Layer As a Preformed SEI on Natural Graphite Powder To Improve Coulombic Efficiency and High-Rate Cycling Stability of Lithium-Ion Batteries". *ACS Appl. Mater. Interfaces*. Vol. 8 (2016). Iss. 10. 6512–6519. Print. **8.** Shockley, J. M., et al. "Third Body Behavior During Dry Sliding of Cold-Sprayed Al-Al₂O₃ Composites: In Situ Tribometry and Microanalysis". *Tribology Letters*. Vol. 54 (2014). 191-206. Print. **9.** Nezhad-Nobijari, M. B., et al. "Evaluation of the aluminide coating on cleaned internal passages of used gas turbine blades". *Surface & Coatings Technology*. Vol. 289 (2016). 206-212. Print. **10.** Pogrebnyak, A. D., et al. "Structure, Properties and Element Composition of Alumina Coatings, Obtained by Micro-Arc". *Proceedings of the International Conference "Nanomaterials: Applications and Properties"* (2012). Vol. 1. No. 2. 02NFC32: 3 p. Print. **11.** Dehnavi, V., et al. "Phase transformation in plasma electrolytic oxidation coatings on 6061 aluminum alloys". *Surface & Coatings Technology*. Vol. 251 (2014). 106-114. Print. **12.** Martin, J., et al. "Influence of electrolyte ageing on the Plasma Electrolytic Oxidation of aluminium". *Surface and Coatings Technology. Special Issue on Plasma Electrolysis: Progress in Science, Technology and Applications of Electrolytic Plasma Surface Treatments and Coatings*. Vol. 269 (2015). 36-46. Print. **13.** Parfenov, E. V., et al. "Towards smart electrolytic plasma technologies: An overview of methodological approaches to process modeling". *Surface and Coatings Technology. Special Issue on Plasma Electrolysis: Progress in Science, Technology and Applications of Electrolytic Plasma Surface Treatments and Coatings*. Vol. 269 (2015). 2-22. Print. **14.** Gutsalenko, Yu. G., O. K. Sevidova, and I. I. Stepanova. *Shlifival'nij krug: patent na korisnu model'*. No. 96568 Ukraine. IPC, 2006.01 B24D 3/06. No. u 201409394. Appl. 26.08.2014. Publish. 10.02.2015. Bull. No. 3. Print. **15.** Gutsalenko, Yu. G., and C. Iancu. "Sovremennyye podhody k organizatsii i realizatsii tehnikeskikh sistem i tehnologiy almazno-iskrovogo shlifovaniya". *Fizicheskie i kompyuternyye tehnologii*. Tr. 21-y mezhdunar. nauch.-prakt. konf. 24-25 dek. 2015 g., g. Kharkov. Dnepropetrovsk: Lira, 2015, pp. 29-38. Print. **16.** Gutsalenko, Yu. G., et al. *Kompozitsiya dlja elektroizoljatsionnykh znosostykh pokryt'iy: patent na korisnu model'*. No.92786 Ukraine. IPC, 2006.01 C08L 63/02, C08J 5/16. No. u 201315441. Appl. 30.12.2013. Publish. 10.09.2014. Bull. No. 17. Print. **17.** Sevidova, O. K., et al. *Sposib formuvannya znosostykh elektroizoljatsionnykh pokryt'iy na splavah alyuminiyu ta titanu: patent na korisnu model'*. No.111473 Ukraine. IPC, 2016.01 C25D 11/00, C25D 11/04 (2006.01), C25D 3/54 (2006.01). No. u 2016 05063. Appl. 06.05.2016. Publish. 10.11.2016. Bull. No. 21. Print. **18.** Suminov, I. V., et al. *Mikrodugovoe oksidirovanie (teoriya, tehnologiya, oborudovanie)*. Moscow: EKOMET, 2005. 368 p. Print. **19.** Jepel'fel'd, A. V. "Primenenie tehnologii mikrodugovogo oksidirovaniya dlja formirovaniya zashhitnykh pokryt'iy". *Tehnologiya mashinostroeniya*. 2004. No. 4. 39-44. Print. **20.** Pavljus, S. G., et al. "Dijelektricheskie svoystva anodno-iskrovnykh silikatnykh pokryt'iy na aljuminii". *Jelektronnaja obrabotka materialov*. 1987. No. 3. 34-36. Print. **21.** Bakovec, V. V., I. P. Dolgovosova, and G. L. Nikifirova. "Oksidnye plenki, poluchennyye obrabotkoj aljuminievykh splavov v koncentrirovannoy sernoy kislyote v anodno-iskrovom rezhime". *Zashhita metallov*. Vol. 22 (1986). No. 3. 440-444. Print. **22.** Belozherov, V. V., A. I. Mahatlova, and E. M. Rebrova. "Issledovanie izmeneniya razmerov detali pri MDO-obrabotke alyuminievykh splavov". *Informatsiyni tehnologiyi: nauka, tehnika, tehnologiya, osvita, zdorov'ya: materialy XVII mizhnar. nauk.-prakt. konf. (20-22 travnya 2009 r., Kharkiv)*. Kharkov: NTU "KhPI", 2009. Part. 1, p. 326. Print. **23.** Gutsalenko, Yu. G., et al. *Shlifival'nij krug: patent na korisnu model'*. No. 117767 Ukraine. IPC, 2006.01 B24D 5/16. No. u 2017 00074. Appl. 03.01.2017. Publish. 10.07.2017. Bull. No. 13. Print.