

**НОВИКОВ Ф. В., НОВИКОВ Г. В.**

## **СТВОРЕННЯ ЕКОЛОГІЧНО БЕЗПЕЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ АЛМАЗНОГО ШЛІФУВАННЯ ВИРОБІВ ІЗ ВАЖКООБРОБЛЮВАНИХ МАТЕРІАЛІВ**

У роботі показано, що найбільш ефективною технологією алмазного шліфування щодо поліпшення екології та культури виробництва є шліфування алмазними кругами на високоміцних металевих зв'язках із застосуванням їх електроерозійної правки для відновлення ріжучих властивостей та підвищення якості й продуктивності обробки. Ця технологія дозволяє вилучити застосування шкідливих електролітів із технологічного процесу правки алмазного круга. Тому в роботі розроблено практичні рекомендації щодо створення на основі застосування електроерозійної правки екологічно чистих та безпечних для здоров'я робітників технологій шліфування алмазно-абразивними інструментами (алмазними кругами) на металевих зв'язках виробів, виготовлених із різноманітних металевих та неметалевих важкооброблюваних матеріалів, включаючи шліфування виробів з твердих сплавів та з наплавленими високоміцними матеріалами, розрізання високотвердих порід каменю, нарізання граней на поверхнях виробів із кристалю, огранювання природних алмазів у діаманти, обробку виробів із важкооброблюваних керамік і феритів та ін. У результаті практичного застосування цих технологій з'явилася можливість здійснювати на промислових підприємствах України екологічно чисту та безпечну для життєдіяльності робітників механічну обробку шліфуванням виробів з матеріалів високої твердості з забезпеченням високих показників якості та продуктивності.

**Ключові слова:** екологія виробництва, здоров'я працівника, шліфування, алмазний круг на металевій зв'язці, електроерозійна правка круга

**НОВИКОВ Ф. В., НОВИКОВ Г. В.**

## **СОЗДАНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ**

В работе показано, что наиболее эффективной технологией алмазного шлифования по улучшению экологии и культуры производства является шлифование алмазными кругами на высокопрочных металлических связках с применением их электроэрозионной правки для восстановления режущих свойств и повышения качества и производительности обработки. Эта технология позволяет исключить применение вредных электролитов из технологического процесса правки алмазного круга. Поэтому в работе разработаны практические рекомендации по созданию на основе применения электроэрозионной правки экологически чистых и безопасных для здоровья рабочих технологий шлифования алмазно-абразивными инструментами (алмазными кругами) на металлических связках изделий, изготовленных из различных металлических и неметаллических труднообрабатываемых материалов, включая шлифование изделий из твердых сплавов и с наплавленными высокопрочными материалами, разрезание высокопрочных пород камня, нарезание граней на поверхностях изделий из хрусталя, огранку природных алмазов в бриллианты, обработку изделий из труднообрабатываемых керамик и ферритов и т. д. В результате практического применения этих технологий появилась возможность производить на промышленных предприятиях Украины экологически чистую и безопасную для жизнедеятельности рабочих механическую обработку шлифованием изделий из материалов высокой твердости с обеспечением высоких показателей качества и производительности.

**Ключевые слова:** экология производства, здоровье работника, шлифование, алмазный круг на металлической связке, электроэрозионная правка круга

**NOVIKOV F. V., NOVIKOV G. V.**

## **CREATION OF ENVIRONMENTALLY SAFE TECHNOLOGIES OF DIAMOND GRINDING OF PRODUCTS FROM HEAVILY PROCESSED MATERIALS**

The paper shows that the most effective diamond grinding technology for improving the ecology and culture of production is grinding with diamond wheels on high-strength metal bonds using their electro-erosion dressing to restore cutting properties and improve the quality and productivity of processing. This technology makes it possible to exclude the use of harmful electrolytes from the technological process of straightening a diamond wheel. Therefore, practical recommendations have been developed in the work on the creation of environmentally friendly and safe for health working technologies for grinding with diamond-abrasive tools (diamond wheels) on metal bonds based on the use of electroerosive dressing. Products made from various metal and non-metal hard-to-cut materials are processed, including grinding products made of hard alloys with welded high-strength materials, cutting high-hard rocks, cutting edges on the surfaces of crystal products, cutting natural diamonds into diamonds, processing products from hard-to-cut ceramics and ferrites etc. As a result of the practical application of these technologies, it became possible to produce environmentally friendly and safe for the life of workers mechanical processing by grinding products from materials of high hardness at industrial enterprises of Ukraine with high quality and productivity.

**Key words:** production ecology, worker's health, grinding, diamond wheel on metal bond, electroerosion grinding wheel

**Вступ.** У виробництві для обробки деталей із матеріалів підвищеної твердості застосовують технологію алмазного шліфування, у тому числі технологію шліфування алмазними кругами на високоміцних металевих зв'язках. Для відновлення різальної здатності цих алмазних кругів застосовують метод електрохімічної правки, який заснований на електрохімічному розчиненні металевої зв'язки в середовищі електроліту. Але, як показує практика, він погіршує екологію та культуру виробництва внаслідок наявності в зоні обробки шкідливих для здоров'я працівника й обладнання сильних електролітів. Потік електроліту, що виходить із отвору в соплі, внаслідок розбризкування охоплює значну частину зони обробки, що викликає корозію обладнання та передчасний вихід його з ладу. Бризки електроліту також потрапляють на руки працівника, що може призвести до його професійного захворювання. При цьому відбувається розпорошення потоку електроліту та утворення електролітного туману, що містить шкідливі для організму людини компоненти, який працівник на протязі зміни вдихає та погіршує своє здоров'я.

© Ф. В. Новіков, Г. В. Новіков, 2023

Найбільш екологічно чистим та безпечним для здоров'я робітників порівняно з методом електрохімічної правки є метод електроерозійної правки, який виключає застосування шкідливих

електролітів з технологічного процесу правки. Цей метод правки можна здійснювати із застосуванням звичайної технічної води, що не чинить шкідливої дії на здоров'я робітника й використовуване обладнання. Тому важливо розробити практичні рекомендації щодо його більш ефективного практичного застосування під час алмазного шліфування виробів, виготовлених із різноманітних металевих та неметалевих важкооброблюваних матеріалів.

**Аналіз основних досягнень та літератури.** Проблемі створення екологічно чистих та безпечних технологій алмазного шліфування виробів, виготовлених із важкооброблюваних матеріалів, у науково-технічній літературі постійно приділяється значна увага. Їй присвячено роботи Беззубенко М. К., Грабченко А. І., Заха-ренко І. П., Рибицького В. А., Лавриненко В. І. [1–3, 5, 6, 11], в яких розглянуто питання підвищення ефективності методів правки алмазних кругів на металевих зв'язках щодо поліпшення технологічних та екологічних умов промислового виробництва. У роботах Беззубенко М. К. [1, 2] показано ефективність застосування прогресивного методу електроерозійної правки алмазних кругів на металевих зв'язках (взаємін традиційно застосовуваних методів механічної та електрохімічної правки) із забезпеченням високих екологічних та техніко-економічних показників алмазного шліфування. Однак кількість питань, виникаючих при цьому, вимагає й подальшого поглибленого вивчення даної проблеми. Тому важливо обґрунтувати вибір оптимальних екологічних рішень при створенні екологічно чистих та безпечних технологій алмазного шліфування. Для цього слід розглянути закономірності формування екологічних умов виробництва при шліфуванні, виявити основні недоліки діючих технологій алмазного шліфування, які пов'язані, головним чином, із застосуванням шкідливих для здоров'я робітників електролітів під час електрохімічної правки алмазних кругів на металевих зв'язках. Це дозволить розробити практичні рекомендації з ефективного застосування електроерозійної правки для підготовки до роботи алмазних кругів на металевих зв'язках та забезпечення екологічно чистих умов шліфування.

**Мета дослідження, постановка проблеми.** Метою дослідження є обґрунтування умов поліпшення екології та культури виробництва на технологічних операціях алмазного шліфування шляхом застосування ефективного методу електроерозійної правки алмазних кругів на високоміцних металевих зв'язках.

Для досягнення цієї мети необхідно:

- обґрунтувати екологічно прийнятні умови переходу від електрохімічної правки алмазних кругів на металевих зв'язках до більш ефективної електроерозійної правки;
- провести експериментальні дослідження екологічних та технологічних умов ефективного застосування електроерозійної правки алмазних кругів на металевих зв'язках під час здійснення алмазного шліфування;
- розробити практичні рекомендації щодо створення екологічно чистих та безпечних для життєдіяльності робітників технологій алмазного шліфування виробів, виготовлених із різноманітних металевих та неметалевих важкооброблюваних матеріалів.

**Матеріали дослідження.** При електрохімічній правці алмазного круга на металевій зв'язці поряд з процесом електрохімічного розчинення металевої зв'язки, внаслідок появи електричних розрядів між алмазним кругом і оброблюваною деталлю, протікає процес електроерозії. У результаті дії електричних розрядів виникає надзвичайно висока температура в зоні різання, що приводить до локального ударно-термічного мікроруйнування металевої зв'язки (рис. 1) [2] та видалення з робочої поверхні круга затуплених алмазних зерен. Це забезпечує високу ріжучу здатність алмазного круга на металевій зв'язці. Встановлено, що чим вище сила електричного струму, що підводиться в зону шліфування, тим більш інтенсивно протікає процес електроерозії й більш значним стає об'єм металевої зв'язки, яка видалається від дії електричних розрядів. Встановлено, що за певних умов об'єм металевої зв'язки, що видалається у результаті дії електричних розрядів, може бути більше об'єму металевої зв'язки, що видалається в процесі її електрохімічного розчинення. Тому в цих умовах відпадає необхідність в електрохімічному розчиненні металевої зв'язки, оскільки її можна видалити завдяки присутності в процесі правки електричних розрядів.

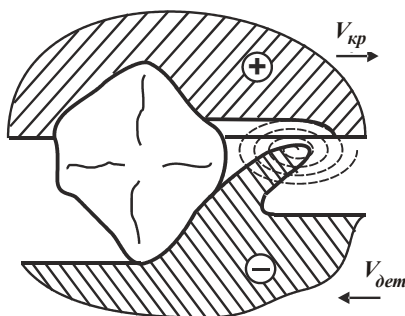


Рисунок 1 – Схема електроерозійної дії на металеву зв'язку алмазного круга ( $V_{кр}$  – швидкість круга;  $V_{дет}$  – швидкість деталі)

Для утворення електричних розрядів між алмазним кругом та оброблюваним матеріалом слід забезпечити певний зазор між ними. Це не вимагає застосування рідини. Застосування рідини може бути пов'язано з поліпшенням умов вимивання із зони обробки продуктів електроерозійного руйнування металевої зв'язки. Виходячи з цього, для ефективного протікання процесу електроерозії достатньо в зону

обробки подавати звичайну технічну воду, яка на відміну від застосовуваних електролітів при електрохімічній правці алмазного круга, виключає шкідливий вплив на здоров'я працівника та устаткування. За суттю, це стало основою широкого застосування на практиці методу електроерозійної правки алмазного круга на металевій зв'язці, який заснований на підведенні до алмазного круга електричної енергії у формі електричних розрядів [1, 2, 4, 7 – 9].

Тому метод електроерозійної правки алмазного круга на металевій зв'язці здійснюється із застосуванням звичайної технічної води (з антикорозійною добавкою: 1,5 – 3 % содового розчину), яка подається через сопло у зону правки. Термічна дія електричного розряду приводить до ерозії ділянок металеві зв'язки алмазного круга й утворення лунок. Продукти ерозії металеві зв'язки у вигляді застиглих частинок вимиваються із зони правки міжелектродного середовища, що приводить до оголення нових зерен і відновлення ріжучої здатності алмазного круга на металевій зв'язці. Цим показано, що метод електроерозійної правки алмазного круга на металевій зв'язці на відміну від методу електрохімічної правки є більш екологічно безпечним та забезпечує високі техніко-економічні показники обробки.

На цій основі розроблено високопродуктивний метод алмазно-іскрового шліфування (електроерозійного шліфування), в якому електроодом служить оброблювана металева деталь, а електричний струм безперервно подається в зону шліфування [1, 2]. У результаті постійно підтримується висока ріжуча здатність алмазного круга на металевій зв'язці, що дозволяє суттєво підвищити якість та продуктивність обробки.

Використовуючи метод електроерозійної правки алмазного круга на металевій зв'язці, розроблено ефективні екологічно чисті та безпечні для здоров'я робітників технології шліфування виробів з важкооброблюваних матеріалів, що має важливе практичне значення [10]. Тому розглянемо деякі з них.

1. При нарізанні граней на поверхнях виробів з кристалю (ваз, графінів, келихів та ін.) традиційно застосовують конусні алмазні круги на високоміцних металевих зв'язках з гострим кутом при вершині, наприклад, на металевій зв'язці М2-01 з розміром зерна алмазного порошку АС6 50 ... 100 мкм (рис. 2).

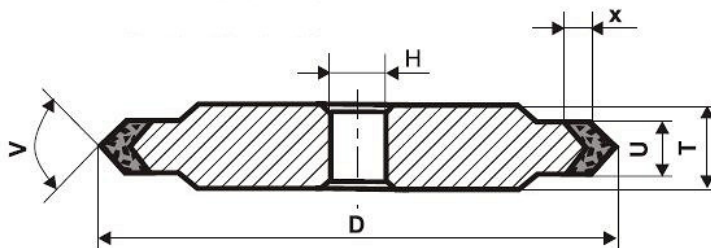


Рисунок 2 – Конусний алмазний круг на металевій зв'язці

Для ефективного застосування ці алмазні круги профілюють на токарному верстаті з метою забезпечення високої гостроти кута у вершині з використанням абразивного бруска, який при обробці притискається до алмазного круга, що обертається. Процес профілювання алмазного круга займає достатньо великий проміжок часу й супроводжується утворенням абразивного пилу, який погіршує екологію виробництва.

Крім того, з технічної точки зору процес механічної правки алмазного круга за допомогою звичайного абразивного бруска не забезпечує необхідної точності робочої частини круга й, особливо, кута у його вершині. Замість гострого кута утворюється радіусний кут, що знижує якість нарізання граней (гострих канавок) на поверхнях виробів з кристалю. Також складно усунути радіальне биття алмазного круга безпосередньо на верстаті, здійснити якісну правку алмазовмісного шару круга (забезпечити значне виступання зерен зі зв'язки). У результаті втрачається товарний вигляд виробів з кристалю та їх дизайн – порушується рисунок і його яскраве зорове сприйняття.

Встановлено, що при нарізанні граней на поверхнях виробів з кристалю алмазним кругом, як і при шліфуванні металевих виробів, можливе утворення припикань, мікротріщин та інших температурних дефектів. Це різко знижує якість обробки й вимагає їх усунення на наступних операціях доведення. Для цього традиційно використовують шкідливу для здоров'я працівника технологію хімічного полірування, яку здійснюють із застосуванням кислоти. Тривалість хімічного полірування залежить від глибини порушеного поверхневого шару виробу з кристалю. Тому з метою зниження негативного впливу на працівника застосовуваної кислоти при хімічному поліруванні важливо зменшити або навіть виключити утворення дефектного шару на поверхні виробу з кристалю в процесі нарізання граней алмазним кругом на металевій зв'язці. Для цього необхідно забезпечити його високу ріжучу здатність шляхом застосування високоефективного нешкідливого для здоров'я працівника метода електроерозійної правки.

Підвищення ріжучої здатності алмазного круга на металевій зв'язці також дозволяє зменшити силу різання й навантаження, які випробовує робітник, тримаючи в руках у процесі обробки виріб з кристалю, тобто в процесі нарізання граней вручну. У результаті обробка виробів гострим алмазним кругом відбувається швидше, й не викликає швидкого стомлення робітника порівняно з обробкою затупленим алмазним кругом, що має місце в діючій технології. Це призводить до підвищення продуктивності праці, а працівник здатний протягом зміни виконувати задану або підвищену норму виробітку.

Тому проблема забезпечення високої ріжучої здатності алмазного круга на металевій зв'язці в процесі нарізання граней на виробках з кришталю має велике практичне значення. Виходячи з цього, для поліпшення екології процесу підготовки алмазного круга до роботи, а також підвищення якості виготовлення виробів з кришталю, доцільно замість механічної правки абразивним брусом використовувати екологічно чисту технологію електроерозійної правки конусних алмазних кругів на високоміцних металевих зв'язках. Проведені експериментальні дослідження [8] показали, що застосування електроерозійної правки дозволяє завдяки підвищенню ріжучої здатності конусного алмазного круга на металевій зв'язці суттєво підвищити продуктивність та якість нарізання граней на виробках з кришталю, знизити значні фізичні навантаження на працівника, які мають місце у процесі "ручного" нарізання граней на виробках з кришталю, а головне – забезпечити екологічно чисті та безпечні умови виробництва виробів з кришталю.

Практика показує, що алмазний круг на металевій зв'язці в процесі обробки періодично затупляється, тому його необхідно правити. Як і при первинній підготовці до роботи, алмазний круг традиційно піддається механічній правці абразивним брусом, який утримує в руках працівник-різьбяр. Однак здійснювана таким способом правка круга на робочому місці не є якісною, оскільки не вдається забезпечити гостру вершину круга та якісно розкрити алмазовмісний шар круга. У результаті робітнику-різьбюру доводиться працювати затупленим алмазним кругом і притискати його до оброблюваного виробу з підвищеним навантаженням, а це, як зазначалося вище, приводить до його швидкої стомлюваності й зниження продуктивності праці. Шліфування затупленим алмазним кругом також приводить до зниження якості обробки. У зв'язку з цим, слід і в даному випадку застосовувати ефективну електроерозійну правку. Однак, оскільки шліфування проводиться вручну, традиційні схеми електроерозійної правки не можна застосувати. Необхідна принципово нова схема правки. Такою схемою може бути правка з використанням ручного ізольованого електроду, як це показано на рис. 3. У цьому випадку ізольований Г-подібний електрод притискається до периферії круга в зоні інтенсивного попадання на нього охолоджуючої рідини, що забезпечує швидке очищення поверхні алмазного круга від продуктів обробки і розкриття його алмазовмісного шару. Як показали проведені дослідження, достатній для правки алмазного круга час складає всього 5 – 7 секунд при силі електричного струму 15 – 20 А. При цьому стійкість алмазного круга на металевій зв'язці М1-01 після правки з використанням ручного ізольованого електроду багаторазово збільшується порівняно зі стійкістю круга після звичайної механічної правки абразивним брусом. Це дозволяє якісно здійснювати нарізання граней на поверхнях виробів з кришталю за умов високої екології виробництва.

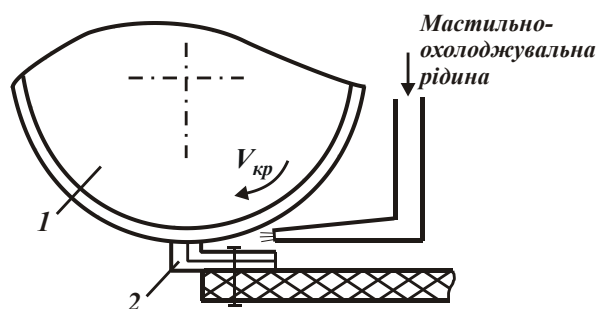


Рисунок 3 – Схема електроерозійної правки алмазного круга (1) з використанням електроду (2), який може утримувати в руках робітник-шліфувальник

Таким чином, розроблені практичні рекомендації створення екологічно чистої та безпечної технології електроерозійної правки алмазного круга на металевій зв'язці для нарізування граней на поверхнях виробів з кришталю відкривають нові технологічні можливості високоякісної та високопродуктивної обробки, що виключає шкідливу дію на здоров'я робітника та забезпечує високу екологію виробництва. Запропонована технологія з високою ефективністю впроваджена у виробництво.

2. Одним з найбільш ефективних умов застосування електроерозійної правки алмазних кругів на високоміцних металевих зв'язках слід розглядати технологію огранювання природних алмазів в діаманти. У зв'язку із високою твердістю природних алмазів їх обробку здійснюють виключно алмазно-абразивними інструментами. Так, на операції круглого зовнішнього шліфування природних алмазів в діаманти традиційно використовують алмазний круг на металевій зв'язці діаметром 150 мм. Правку цього алмазного круга традиційно здійснюють електрохімічним методом. Для цього алмазний круг, що обертається з високою швидкістю (до 20 м/с), у процесі шліфування поміщають у ванну з електролітом. Це дозволяє безперервно розчиняти поверхневий шар металеві зв'язки алмазного круга і видаляти верхній ряд затуплених алмазних зерен, що забезпечує високу різальну здатність алмазного круга та підвищення продуктивності й якості обробки. У той же час, у результаті розбризкування електроліту і забруднення ім робочого місця верстатника у процесі шліфування доводиться значно зменшувати швидкість обертання алмазного круга. Це приводить до зменшення продуктивності обробки та не дозволяє підвищити ефективність обробки.

Однак, найбільш важливим недоліком цього процесу обробки є небезпечна дія електроліту на здоров'я верстатника. Електроліт шкідливо діє на його руки і органи дихання. Причому, на операціях шліфування й

огранювання природних алмазів в діаманти на цих підприємствах задіяно багато верстатників, оскільки обробка діамантів здійснюється на багатьох верстатах. Тому на підприємствах, що займаються виробництвом діамантів із природних алмазів, постійно поставали питання заміни цієї небезпечної для здоров'я верстатників технології більш безпечною технологією, яка б не була шкідливою для їх здоров'я. У результаті для практичного використання було впроваджено у виробництво ефективно екологічно безпечну технологію електроерозійної правки алмазних кругів на металевих зв'язках. Це дозволило відмінити шкідливу електрохімічну правку алмазного круга на металевій зв'язці у ванні з електролітом.

Таким чином, впровадження електроерозійної правки алмазного круга дозволило суттєво поліпшити екологію технологічного процесу шліфування й огранювання природних алмазів в діаманти, виключити шкідливий вплив електроліту на здоров'я верстатника і навколишнє середовище, а також підвищити продуктивність та якість обробки природних алмазів в діаманти.

Крім шкідливого для здоров'я верстатника алмазного електрохімічного шліфування, на технологічних операціях огранювання природних алмазів у діаманти традиційно використовують спеціальні алмазні круги, виготовлені електрогальванічним методом – шляхом осідання алмазного порошку, який знаходиться у ванні з водою, на тонкий корпус (диск діаметром 300 мм і товщиною 10 – 15 мм) шліфувального круга. Диск круга виготовляють із спеціального чавуну, а алмазовмісний шар наносять на поверхню диску шириною 60 мм від його краю. Закріплюють алмазний порошок зернистістю 7/5 мкм на поверхні диску складом ряду металів – застосовують нікель або інші пластичні метали. У результаті на робочій поверхні круга утворюється міцне одношарове алмазно-нікелеве з'єднання, що складається з виступаючих на певну висоту алмазних зерен, які при шліфуванні повинні виконувати функцію ріжучих елементів. Алмазні круги, виготовлені електрогальванічним методом, отримали широке застосування на операціях огранювання природних алмазів в діаманти. Ефект обробки полягає в тому, що в цих кругах алмазні зерна виступають приблизно на однакову висоту й мають високу поверхневу концентрацію – до 400 %. Це забезпечує високопродуктивне знімання оброблюваного матеріалу й високоякісну обробку.

Звичайні алмазні круги на металевих зв'язках, що виготовляються методом пресування й спікання, тобто методом порошкової металургії, мають концентрацію алмазних зерен до 200 %, різновисотне розташування ріжучих зерен на робочій поверхні круга й биття круга 0,1 мм й більше, що фактично виключає їх ефективне застосування для огранювання природних алмазів в діаманти.

Для нормальних умов обробки биття круга не повинно перевищувати 0,01 мм. Очевидно, забезпечити таку високу точність алмазного круга традиційними методами механічної правки неможливо. Крім того, неможливо виготовити алмазні круги методом пресування й спікання з концентрацією алмазних зерен 200 % й більше, що необхідно для здійснення огранювання природних алмазів в діаманти. Тому алмазні круги, що виготовляються методом пресування й спікання, не отримали застосування в діамантовому виробництві. Разом з тим, як показує практика, технологія виготовлення алмазних кругів електрогальванічним методом характеризується дуже низькою екологією виробництва в зв'язку з наявністю електрохімічних процесів у великих ваннах, заповнених технічною водою. Працювати в цих умовах надзвичайно складно, оскільки в кінцевому підсумку це призводить до професійних захворювань працівників.

Тому для забезпечення екологічно чистих (нешкідливих) для здоров'я працівників умов праці слід відмовитися від виробництва алмазних кругів електрогальванічним методом й виготовляти алмазні круги на металевих зв'язках методом пресування й спікання (методом порошкової металургії), який характеризується більш вигідними умовами з екологічної точки зору виробництва. Завдяки використанню електроерозійної правки з'являється можливість їх ефективної підготовки для огранювання природних алмазів в діаманти, виключаючи шкідливі для здоров'я працівників умови виготовлення алмазних кругів електрогальванічним методом. За наявними даними, електроерозійна правка забезпечує точність робочої поверхні алмазного круга в межах 0,01 мм, чого цілком достатньо для здійснення процесу огранювання природних алмазів в діаманти. Основним недоліком обробки у даному випадку є відносно низька концентрація алмазних зерен в крузі, що складає всього 100 – 150 %. Для усунення цього недоліку в процесі обробки слід використовувати додатково алмазний порошок у вільному стані для шаржування ним робочої поверхні круга. У результаті поверхневу концентрацію алмазних зерен в крузі можна збільшити, що є необхідною умовою здійснення процесу огранювання природних алмазів в діаманти та відходу від виготовлення тонких алмазних кругів електрогальванічним методом, який екологічно шкідливий для здоров'я робітників.

3. Технологію електроерозійної правки алмазних кругів на металевій зв'язці було ефективно використано під час виготовлення керамічних деталей, які представляли собою різні за габаритами пластини (10×10 мм, 20×20 мм, 20×40 мм товщиною до 1 мм й вище). Під час шліфування цих керамічних пластин традиційно використовували алмазні круги на металевій зв'язці М1-01. Обробку пластин у розмір здійснювали на плоскошліфувальному верстаті. Ця обробка характеризувалася високою трудомісткістю, оскільки керамічний матеріал є дуже крихким і отримати товщину в 1 мм складно: пластини тріскалися, відсоток їх виготовлення без тріщин був незначним.

Перед шліфуванням керамічні пластини приклеювали на великі металеві оправки, які потім укладали на магнітну плиту верстату. Для цього використовували клей на основі воску. В процесі нагрівання металевої оправки до температури 70° – 80° віск плавився і на нього укладали керамічні пластини. Після охолодження воску керамічні пластини міцно утримувалися на металевій оправці. Для охолодження оброблюваних пластин у процесі шліфування використовували емульсію або гас. Перевагу віддавали гасу, оскільки він краще впливав на процес шліфування.

Коли деталі шліфували в гасі, то біля верстату утворювався туман із гасу, який буквально "висів" у повітрі. Це викликало значні труднощі під час роботи верстатника. Із-за величезної вологості повітря цей туман із гасу створював дуже важку картину – зовсім не було чим дихати на робочому місці. Звичайно, працювала вентиляція, однак вона допомагала мало. Все це вимагало вдосконалення технології шліфування та покращання умов праці верстатників.

Ефективним рішенням стало використання шліфувальних верстатів моделі 3102. Це верстати з двома вертикальними шпинделями та двома алмазними кругами, які дозволяли підвищити продуктивність обробки у декілька разів порівняно із обробкою на плоскошліфувальному верстаті. Між алмазними кругами встановлювали потрібний розмір – за товщиною керамічної пластини та здійснювали шліфування. Для цього застосовували тарілчасті алмазні круги діаметром 250 мм на металевій зв'язці М1-01. Щоб уникнути електроерозійної правки алмазних кругів у гасі та ліквідувати цей екологічно брудний етап технологічного процесу, було запропоновано їх електроерозійну правку здійснювати із застосуванням більш екологічно чистого технологічного середовища – емульсії (а в кращому випадку технічної води).

Такий процес більш прийнятний, оскільки використання звичайної води покращило екологію виробництва. При цьому також підвищився відсоток оброблених керамічних пластин без тріщин. Однак це досягалося за умови шліфування гострим алмазним кругом. За умови затуплення алмазного круга розтріскування керамічних пластин різко збільшувалося, а їх розмір не витримувався. Тому алмазний круг необхідно було часто піддавати правленню: 1 – 2 рази за зміну – все залежало від кількості пластин у оброблюваній партії. Основною причиною інтенсивного затуплення алмазних кругів була велика міцність керамічних пластин. Правку алмазних кругів здійснювали 1 – 2 рази за зміну – все залежало від кількості пластин у оброблюваній партії.

Процес правки алмазних кругів здійснювали на електроерозійному верстаті з потужним генератором електричних імпульсів, який встановлювали у окремому приміщенні. Електроерозійну правку алмазного круга

здійснювали у гасі (знову ж не відійшли від цього несприятливого гасу), який приводив до гару і запаху горілого. Цей процес за часом тривав довго і був екологічно брудним. Із метою покращення умов праці з точки зору екологічно безпечної роботи та виключення шкідливого впливу гасу на організм верстатника було встановлено сильні витяжні пристрої. Але проблему гігієни праці все ж не було вирішено.

Для здійснення електроерозійної правки алмазні круги знімали з шліфувального верстата і встановлювали на ерозійний верстат. Нове базування призводило до певних перекосів на крузі, що збільшувало час електро-ерозійної правки і вирівнювання робочої поверхні круга (час обчислювався у хвилинах, тобто це достатньо тривалий процес).

Після правки алмазних кругів необхідно було достатньо точно встановлювати їх на шліфувальний верстат. На це витрачали дуже багато часу, оскільки робота була складною і її міг виконувати лише кваліфікований спеціаліст. У результаті нове базування призводило до перекосів алмазних кругів і вони працювали неповною поверхнею, що знижувало час їхньої роботи. Затуплений алмазний круг також негативно впливав на теплові процеси шліфування та призводив до зниження якості оброблених керамічних пластин і зниження працездатності підшипників шпинделя шліфувального верстата. Тому верстатники, як правило, не здійснювали електро-ерозійної правки алмазного круга, а працювали затупленими алмазними кругами. Це призводило до суттєвого зниження якості оброблених керамічних пластин.

Важливим вирішенням цієї проблеми стало здійснення електроерозійної правки алмазних кругів безпосередньо на шліфувальному верстаті без зняття алмазного круга та подальшого повторного його встановлення на шліфувальний верстат. У результаті було отримано позитивні результати. У процесі електроерозійної правки алмазні круги відводили один від одного (на верстаті це легко зробити) і поміщали між ними правлячий електрод. За умови здійснення такої технології електроерозійної правки биття на поверхні алмазних кругів фактично було відсутнє, чого не досягалося раніше під час здійснення процесу правки на ерозійному верстаті. Тому після правки гострі алмазні круги не призводили до значного розтріскування керамічних пластин у процесі шліфування, а час між правками алмазних кругів збільшувався.

За такого підходу вирішувалося багато питань: відпадала необхідність використання окремого верстата для ерозійної правки та робітника, який обслуговував цей верстат; вдалося зменшити кількість слюсарів, які знімали та встановлювали алмазні круги для здійснення електроерозійної правки; зникла проблема з використанням гасу на шліфувальному та ерозійному верстатах. Ці питання вирішувалися завдяки відсутності биття поверхні алмазного круга та досягнутій його високій гостроті. Це дозволило, по-перше, покращити екологію обробки та уникнути небезпек життєдіяльності верстатників із точки зору їх здоров'я, а, по-друге, суттєво підвищити техніко-економічні показники обробки керамічних пластин. Крім того, на плоскошліфувальних верстатах алмазні круги на металевій зв'язці М1-01 піддавали правці абразивними кругами, а це було коштовно. Тому перехід на електроерозійну правку алмазних кругів був дуже вигідним. Що стосується охорони праці, то відмова від використання гасу на виробництві та у процесі шліфування на ерозійному верстаті дуже віталася.

4. У радіо- та телевізійній промисловості широко використовують вироби, виготовлені з марганець-цинкових та барієвих феритів. Однак, як показує практика, технологія їх виготовлення на остаточних операціях механічної обробки (алмазного шліфування) дуже недосконала і характеризується високою трудомісткістю та низькою продуктивністю праці. Операції алмазного шліфування плоских поверхонь виробів із феритів здійснюють на шліфувальних верстатах із обертаючим столом моделі 3Б756. Для цього

застосовують великогабаритні (діаметром 800 мм) торцеві збірні алмазні круги на високоміцній металевій зв'язці M2-01, у яких різальні алмазні елементи (циліндричні вставки діаметром 40 мм) розміщено вздовж краю торцевої поверхні алмазного круга (рис. 4).

У процесі складання різальних алмазних елементів на крузі має місце їх значне різновисотне розташування – у межах 1 мм. Для усунення цього значного різновисотного розташування алмазних елементів на крузі застосовують традиційну технологію їх шліфування великогабаритним абразивним кругом – діаметром 900 мм та висотою 100 мм. Оскільки за твердістю алмаз значно перевершує звичайні абразивні матеріали (електрокорунд, карбід кремнію, карбід бору тощо), із яких виготовляють абразивні круги, то у процесі вирівнювання алмазовмісного шару алмазного круга абразивний круг зношується інтенсивно. Це призводить до утворення абразивного пилу на робочому місці та погіршення екології виробництва. Крім того, процес шліфування трудомісткий, а оброблений таким способом великогабаритний збірний торцевий алмазний круг має низьку працездатність.

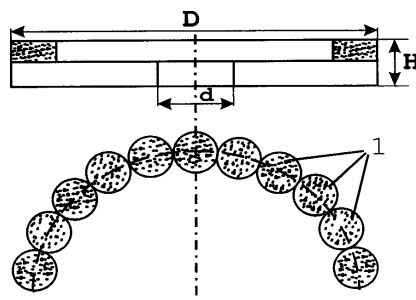


Рисунок 4 – Великогабаритний збірний алмазний круг для торцевого шліфування виробів із феритів: 1 – різальні алмазні елементи

Як показує практика, після здійснення операції вирівнювання алмазовмісного шару у великих збірних алмазних кругах із застосуванням діючої технології абразивного шліфування доводиться совковою лопатою чистити відходи від абразивних кругів – настільки багато їх утворювалося на робочому місці. Тому постійно виникали вимоги до керівництва підприємства замінити цю неефективну технологію більш прогресивною з точки зору, насамперед, поліпшення гігієни праці: усунення утворення шкідливого для здоров'я верстатників абразивного пилу на робочому місці. Одним із можливих варіантів вирішення проблеми міг би бути варіант застосування абразивних кругів більшої твердості. Однак, вартість таких абразивних кругів дуже висока. Крім того, потрібно було забезпечити велику їхню кількість. Тому прийняли рішення застосувати на підприємстві сучасну вискоелективну технологію електроерозійної правки збірних великогабаритних торцевих алмазних кругів на металевих зв'язках. Ця технологія є екологічно чистою та безпечною для здоров'я верстатників, оскільки не вимагає застосування шкідливих для їх здоров'я електролітів, що має місце під час здійснення електрохімічного правлення алмазних кругів. Замість електролітів використовують звичайну технічну воду, що є важливим чинником забезпечення безпеки життєдіяльності верстатників у даних умовах виробництва.

Під час електроерозійного правлення відбувається ударно-термічна дія на поверхню металевої зв'язки алмазного круга та її ерозійне термічне руйнування (випалювання) а, відповідно, усунення різновисотного розташування різальних алмазних елементів на крузі. При цьому досягається значна розвиненість ріжучого рельєфу алмазного круга та досягається його висока ріжуча здатність, що сприяє підвищенню техніко-економічних показників процесу шліфування виробів із феритів.

Завдяки застосуванню розробленої технології електроерозійного правлення та створенню спеціального технологічного оснащення забезпечено профілювання на алмазному крузі збірного конусу. Це має надзвичайно велике значення для ефективного здійснення процесу алмазного шліфування виробів із феритів. Згідно з діючою технологією, забезпечити профілювання алмазного круга із застосуванням звичайного абразивного круга було занадто складно, що приводило до різкого зниження якості та продуктивності обробки виробів із феритів.

Отже, у результаті застосування розробленої технології електроерозійного правлення великогабаритного збірного алмазного круга вдалося багаторазово знизити трудомісткість підготовки його до роботи порівняно із діючою технологією абразивного шліфування. Також вдалося знизити енергоємність процесу алмазного шліфування виробів із феритів та, відповідно, сили і температуру різання та підвищити якість і продуктивність обробки. Це дозволило підвищити відсоток виходу придатних виробів завдяки зменшенню кількості сколів на оброблених виробах та виключенню інших дефектів обробки. Крім того, для здійснення процесу шліфування виробів із феритів було застосовано алмазні круги на більш міцних кобальтових зв'язках. Це призвело до більш суттєвого підвищення якості та продуктивності обробки. Таким чином, застосування прогресивної технології електроерозійного правлення алмазних кругів стало дієвим чинником підвищення рівня культури виробництва та безпеки життєдіяльності верстатників, оскільки технологія є екологічно чистою та придатною із точки зору охорони праці та збереження здоров'я верстатників.

Розроблену технологію електроерозійного правлення збірних великогабаритних алмазних кругів на металевих зв'язках для торцевого шліфування виробів із марганець-цинкових та барієвих феритів впроваджено у Науково-виробничій фірмі "Феррокерам" (м. Біла Церква, Київська область) – основному виробнику виробів із феритів в Україні. Із використанням цих технологій було переобладнано більше 20 верстатів моделі ЗД765. Вони були укомплектовані необхідною кількістю спеціальних генераторів імпульсного електричного струму та спеціального технологічного оснащення для електроерозійного правлення великогабаритних збірних торцевих алмазних кругів із ріжучими алмазними елементами великої зернистості 315/250 на високо-міцних кобальтових зв'язках та металевих зв'язках М2-01. Ця технологія також отримала подальший розвиток на інших підприємствах електронної промисловості, зокрема, під час обробки виробів, виготовлених з різних технічних керамік (керамічних пластин тощо).

5. Особливо значний ефект від застосування методу електроерозійної правки досягнуто під час підготовки до роботи великогабаритних сегментних алмазних пил діаметром 1000 мм та більше із зернистістю 1000/800, які застосовують під час розрізання високотвердих порід каменю (мармур, граніт тощо). Для високопродуктивного усунення різновисотного виступання алмазовмісних елементів на алмазній пилі (висотою до 1 мм) були застосовані генератори імпульсного електричного струму підвищеної потужності. Це дозволило замінити традиційно застосовуване на практиці обладнання для механічної обробки (шліфування абразивним кругом) великогабаритних сегментних алмазних пил. За цією технологією витрачали велику кількість абразивних кругів, які внаслідок інтенсивного зношування перетворювалися в абразивні відходи з утворенням абразив-ного пилу, шкідливого для здоров'я робітника та нормальної роботи обладнання.

Під час електроерозійної правки великогабаритних сегментних алмазних пил слід розглядати ефективним застосування гнучкого електроду у вигляді щітки. Це дозволяє здійснювати електроерозійну правку одночасно всіх алмазовмісних елементів, що мають різну висоту виступання на алмазній пилі, оскільки під час застосування жорсткого електроду електроерозійній правці в початковий період будуть піддаватися лише найбільш виступаючі алмазовмісні елементи алмазних пил. У кінцевому підсумку це сприяє підвищенню продуктивності процесу правки алмазної пилі й скороченню часу його здійснення. Крім того, застосування гнучкого електроду (завдяки суттєвому підвищенню щільності електричного струму) дозволяє підвищити якість розкриття алмазо-вмісного шару пилі – алмазні зерна значно виступають над рівнем металевій зв'язці, що сприятливо позначається на її ріжучій здатності й дозволяє підвищити продуктивність та якість обробки.

Метод електроерозійної правки алмазних кругів на металевих зв'язках також ефективно застосовано для здійснення алмазного шліфування виробів, виготовлених із твердих сплавів, з наплавленими високоміцними матеріалами та ін. Таким чином, на конкретних прикладах показано, що впровадження у виробництво екологічно чистої та безпечної технології електроерозійної правки алмазного круга на металевій зв'язці дозволяє кардинально покращити екологію та культуру виробництва, забезпечити безпеку життєдіяльності та умови охорони праці на робочому місці, забезпечити ефективне виготовлення виробів із матеріалів високої твердості з високими показниками якості та продуктивності.

**Висновки.** У результаті аналізу літературних джерел щодо обґрунтування умов поліпшення екології виробництва виробів, виготовлених із важкооброблюваних металевих та неметалевих матеріалів, виявлено, що найбільш ефективною є технологія шліфування алмазними кругами на високоміцних металевих зв'язках із застосуванням їх електроерозійної правки для відновлення ріжучих властивостей та підвищення якості та продуктивності обробки. На відміну від традиційно застосовуваних методів механічної та електрохімічної правки алмазних кругів, застосування електроерозійної правки дозволяє значно покращити екологію виробництва, не чинить шкідливої дії здоров'ю робітника й використовуване устаткування. Це відкриває широкі перспективи створення екологічно чистих та безпечних технологій алмазного шліфування виробів, виготовлених із металевих та неметалевих важкооброблюваних матеріалів.

Виходячи з цього, у роботі розроблено практичні рекомендації щодо створення на основі застосування електроерозійної правки екологічно чистих технологій шліфування алмазно-абразивними інструментами (алмазними кругами) на металевих зв'язках виробів, виготовлених із різноманітних металевих та неметалевих важкооброблюваних матеріалів, включаючи шліфування виробів з твердих сплавів та з наплавленими високоміцними матеріалами, розрізання високотвердих порід каменю, нарізання граней на поверхнях виробів із кристалу, огранювання природних алмазів в діаманти, обробку виробів із важкооброблюваних керамік й феритів та ін. У результаті практичного застосування цих технологій з'явилася можливість здійснювати на промислових підприємствах України екологічно чисту та безпечну механічну обробку шліфуванням виробів з матеріалів високої твердості з забезпеченням високих показників якості та продуктивності. Це дозволить виготовляти конкурентоздатну промислову продукцію для внутрішнього й зарубіжного використання.

#### Список літератури:

1. Беззубенко Н. К. Повышение производительности алмазного шлифования / Н. К. Беззубенко // Авиационно-космическая техника и технология. Труды Государственного аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского "ХАИ". – Харьков: ХАИ, 2000. – Вып. 14. – С. 296–302.
2. Беззубенко Н. К. К вопросу выбора режима работы режущих зерен при алмазно-искровом шлифовании / Н. К. Беззубенко // Резание и инструмент. – 1979. – Вып. 22. – С. 3–6.
3. Захаренко И. П. Основы алмазной обработки твердосплавного инструмента / И. П. Захаренко. – К.: Наукова думка, 1981. – 300 с.
4. Иванов Н. П. Интенсивность электроэрозии алмазных кругов при использовании источника постоянного тока / Н. П. Иванов, ISSN 2079–004X(Print), ISSN 2786–7587(Online). Вісник НТУ «ХПІ». 2023.№1 (7)



- Л. Е. Кобзарь // Резание и инструмент. – 1984. – Вып. 31. – С. 26–31.
5. Интегрированные процессы обработки материалов резанием : учебник / А. И. Грабченко, В. А. Залого, Ю. Н. Внуков и др.; под общ. ред. А. И. Грабченко и В. А. Залого. – Сумы: Университетская книга, 2017. – 451 с.
  6. Лавриненко В. И. Инструменты из сверхтвердых материалов в технологиях абразивной и физико-технической обработки: монография / В. И. Лавриненко, В. Ю. Солод. – Каменское: ДГТУ, 2016. – 529 с.
  7. Новиков Г. В. Глубинное алмазное электроэрозионное шлифование / Г. В. Новиков // *Авиационно-космическая техника и технология. Труды Государственного аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского "ХАИ"*. Выпуск 14. – Харьков: Государственный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", 2000. – С. 303-309.
  8. Новиков Г. В. Обоснование и выбор оптимального электрического режима электроэрозионной правки алмазных кругов на металлических связках / Г. В. Новиков // *Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства*. – Харків: ХДТУСГ, 2005. – Вып. 33. – С. 180–185.
  9. Новиков Г. В. Прогрессивные технологии алмазно-абразивной обработки природных алмазов в бриллианты / Г. В. Новиков // *Вісник НТУ "ХПІ"*. Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2011. – № 40. – С. 72–90.
  10. Новиков Ф. В. Сучасні екологічно безпечні технології виробництва : монографія / Ф. В. Новиков, В. О. Жовтобрюх, Г. В. Новиков. – Дніпро : ЛІРА, 2017. – 372 с.
  11. Робочі процеси високих технологій в машинобудуванні: навчальний посібник / за редакцією А. І. Грабченко. – Харків, ХДПУ, 1999. – 436 с.

#### Bibliography (transliterated):

1. Bezzubenko N. K. Povysheniye proizvoditel'nosti almaznogo shlifovaniya / N. K. Bezzubenko // *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya. Trudy Gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. N.Ye. Zhukovskogo "KHAI"*. – Khar'kov: KHAI, 2000. – Вып. 14. – С. 296–302.
2. Bezzubenko N. K. K voprosu vybora rezhima raboty rezhushchikh zeren pri almazno-iskrovom shlifovanii / N. K. Bezzubenko // *Rezaniye i instrument*. – 1979. – Вып. 22. – С. 3–6.
3. Zakharenko I. P. Osnovy almaznoy obrabotki tverdospavnogo instrumenta / I. P. Zakharenko. – K.: Naukova dumka, 1981. – 300 s.
4. Ivanov N. P. Intensivnost' elektroerozii almaznykh krugov pri ispol'zovanii istochnika postoyannogo toka / N. P. Ivanov, L. Ye. Kobzar' // *Rezaniye i instrument*. – 1984. – Вып. 31. – С. 26–31.
5. Integrirovannyye protsessy obrabotki materialov rezaniyem: uchebnik / A. I. Grabchenko, V. A. Zaloga, YU. N. Vnukov i dr.; pod obshch. red. A. I. Grabchenko i V. A. Zalogi. – Sumy: Universitetskaya kniga, 2017. – 451 s.
6. Lavrinenko V. I. Instrumenty iz sverkhтвердых материалов v tekhnologiyakh abrazivnoy i fiziko-tekhnicheskoy obrabotki: monografiya / V. I. Lavrinenko, V. YU. Solod. – Kamenskoye: DGTU, 2016. – 529 s.
7. Novikov G. V. Glubinnoye almaznoye elektroerozionnoye shlifovaniye / G. V. Novikov // *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya. Trudy Gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. N. Ye. Zhukovskogo "KHAI"*. Выпуск 14. – Khar'kov: Gosudarstvennyy aerokosmicheskyy universitet im. N.Ye. Zhukovskogo "KHAI", 2000. – С. 303-309.
8. Novikov G. V. Obosnovaniye i vybor optimal'nogo elektricheskogo rezhima elektroerozionnoy pravki almaznykh krugov na metallicheskih svyazkakh / G. V. Novikov // *Visnyk Kharkivs'koho derzhavnogo tekhnichnogo universytetu sil's'koho hospodarstva*. – Kharkiv: KHDTUS-H, 2005. – Вып. 33. – С. 180–185.
9. Novikov G. V. Progressivnyye tekhnologii almazno-abrazivnoy obrabotki prirodnykhalmazov v brilliandy / G. V. Novikov // *Visnyk NTU "KHPI"*. Zbirnyk naukovykh prats'. Tematychnyy vypusk: Tekhnolohiyi v mashynobuduvanni. – Kharkiv: NTU "KHPI". – 2011. – № 40. – С. 72–90.
10. Novikov F. V. Suchasni ekolohichno bezpechni tekhnolohiyi vyrobnytstva : monohrafiya / F. V. Novikov, V. O. Zhovtobryukh, H. V. Novikov. – Dnipro : LIRA, 2017. – 372 s.
11. Robochi protsesy vysokoykh tekhnolohiy v mashynobuduvanni: navchal'nyy posibnyk / za redaktsiyeyu A. I. Hrabchenko. – Kharkiv, KHDPU, 1999. – 436 s.

*Поступила (received) 01.08.2022*

#### *Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Новіков Федір Васильович (Новиков Федор Васильевич, Novikov Fedir Vasilivych)** – доктор технічних наук, професор кафедри "Технологій і безпеки життєдіяльності" Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця, м. Харків; тел.: +38-067-68-90-342; e-mail: [novikovfv@i.ua](mailto:novikovfv@i.ua) ORCID: 0000-0001-6996-3356

**Новіков Григорій Васильович (Новиков Григорий Васильевич, Novikov Grigoriy Vasilivych)** – кандидат технічних наук, науковий співробітник Наукового центру НТК "Ельбор", м. Харків; тел.: +38-067-68-90-342; e-mail: [novikovfv@i.ua](mailto:novikovfv@i.ua) ORCID: 0000-0002-5179-7967