

УДК 621.785

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2020.88.1.113

## АЛГОРИТМ ВЫБОРА МАТЕРИАЛА ЭЛЕКТРОДА ПРИ ЭЛЕКТРОИСКРОВОМ ЛЕГИРОВАНИИ ДЕТАЛЕЙ

Богданов А.А., Процив В.В., Пацера С.Т., Дербаба В.А.

Национальный технический университет «Днепровская политехника»

*Аннотация.* Повышение качества поверхностного слоя новых и восстанавливаемых деталей машин легированием. Разработка алгоритма выбора материала электрода для электроискрового легирования деталей на основе метода последовательного приближения.

*Ключевые слова:* электроискровое легирование, электрод, восстановление деталей.

### Введение

Одним из путей улучшения качества поверхностного слоя и снижения стоимости ремонта машин являются многократное восстановление формы деталей металлопокрытиями. Восстановление изношенных поверхностей деталей осуществляется следующими способами: детонационно-газовая и вакуумно-плазменная обработка, наплавка, гальванопокрытия, металлизация напылением, электроискровое легирование.

Среди рассматриваемых методов все более широкое применение находит метод электроискрового легирования (ЭИЛ) [1, 2]. По своим достоинствам он не только не уступает рассматриваемым методам, а во многих случаях превосходит их.

Физические процессы, протекающие при электроискровом легировании, предотвращают проявление таких агрессивных видов износа, как абразивный и схватывание. При этом живучесть легированного слоя определяется развитием усталостных процессов.

### Анализ публикаций

В последние годы разработаны технологические приемы, позволяющие осуществлять ЭИЛ с любой заданной площадью поверхностного слоя изделия, а также создано оборудование и разработаны методы имитационно-статистического моделирования процессов контроля качества деталей, резко повысившее производительность процесса [3–5]. Толщина поверхностного слоя на детали после электроискрового легирования контролируется при помощи современного измерительного оборудования [6].

В зависимости от силовых, скоростных и тепловых параметров очага трения на деталях и механического воздействия [7] проявляются следующие виды износа: окислительный, схватывание первого и второго рода, абразивный, усталостный и термоуста-

лостный. Каждый из них характеризуется своей удельной работой разрушения поверхностного слоя. Поэтому задача повышения износостойкости решается путем создания необходимых условий для перехода от менее энергоемкого вида разрушения к более энергоемкому. Наименьшей энергоемкостью из перечисленных видов обладает абразивный износ. Для его ликвидации достаточно повысить твердость поверхностного слоя детали до уровня, определяемого соотношением  $H_p > 1,2 \cdot H_1$ , где  $H_1$  – твердость абразива;  $H_p$  – твердость изнашиваемого материала.

### Цель и постановка задачи

Предлагается для повышения износо- и жаростойкости деталей осуществлять ЭИЛ электродом, материал которого обеспечит формирование в поверхностном слое метастабильных структур, которые под воздействием давления и температуры способны к многократным фазовым превращениям. Для поиска таких материалов электродов разработан алгоритм, основанный на методе последовательного приближения.

### Основной материал исследований

Несмотря на широкие возможности метода электроискрового легирования, эффективность его применения в машиностроении незначительна. Это объясняется низкой производительностью процесса, отсутствием технологических приемов управления, площадью легированного слоя, высоким уровнем его шероховатости и отсутствием рекомендаций по целенаправленному выбору материала электрода, обеспечивающего максимальное повышение эксплуатационных свойств деталей, работающих в конкретных условиях.

Из теории прочности [8] известно, что основу приемов повышения твердости металлов составляет искусственное создание сопротивления перемещению дислокаций.

Сопротивление перемещению дислокаций могут оказывать: атмосферы Коттрела и Судзуки, состоящие из примесных атомов, двух- или трехмерные стопоры в виде сетки субграниц и выделения другой фазы.

Известно, что в процессе ЭИЛ образуется упорядоченная трехмерная ячеистая структура. Кроме того, происходит насыщение легированного слоя компонентами газовой фазы и элементами, входящими в состав материала электрода. В результате легированный слой приобретает твердость от 12000 до 40000 МПа.

При обработке металлов давлением обычно абразивом являются окислы железа. Наибольшей твердостью из них (10000 МПа) обладает  $\gamma - \text{Fe}_2\text{O}_3$  [8]. Поэтому после ЭИЛ металлокерамическими электродами на поверхности деталей отсутствуют следы абразивного воздействия [8].

Предотвратить схватывание первого рода позволяют следующие мероприятия [9]: использование в качестве пары трения материалов, кристаллические решетки которых существенно отличаются своими параметрами и формированием между их поверхностями твердых или жидких разделительных пленок.

Интенсивность схватывания второго рода уменьшается при повышении температур плавления и ползучести поверхностного слоя материалов [9].

При ЭИЛ электродом, содержащим тугоплавкие элементы и их соединения, выполняются оба условия, поскольку легирование этими элементами повышает температуру плавления исходного материала, а образование трехмерной ячеистой субструктуры способствует повышению температуры ползучести.

Таким образом, в результате ЭИЛ наиболее распространенными электродами типа ВК и ТК автоматически выполняются условия, предотвращающие проявление абразивного износа и схватывания. После такого вида обработки детали начинают работать в условиях окислительного износа. Поэтому применение ЭИЛ для обработки деталей, работающих в различных условиях, практически всегда дает положительные результаты [10, 11], хотя при этом редко удается добиться повышения износостойкости более чем в 1,5–2 раза. Таким образом, дальнейшее повышение служебных свойств деталей невозможно без целенаправленного поиска материалов электродов, учитывающего конкретные условия ее работы и базирующегося на современных достижениях науки.

Под воздействием трения исходный поверхностный слой материала претерпевает ряд последовательных переходов из одного состояния в другое, об этом свидетельствует присутствие продуктов фазовых превращений, вызываемых закалкой, отпуском и вторичной закалкой [9]. Этому способствует, нагрев материала в очаге трения до температур выше критических с последующим быстрым охлаждением до комнатных температур, причем критические точки могут существенно снижаться под действием деформации. Эта особенность процесса позволяет использовать фазовые превращения для поглощения энергии, поступающей из очага трения без разрушения поверхностного слоя материала.

Существует принципиальная возможность искусственного создания материала поверхностного слоя на деталях, структура которого под воздействием энергии очага трения способна к многократным фазовым превращениям, а процесс нарушения ее обратимости может протекать по пути последовательных карбидных превращений.

В качестве управляющих факторов при создании такого слоя могут быть использованы: электрический режим обработки, химические элементы, вводимые в состав легированного слоя, и их процентное содержание, а также технологическая схема обработки (одноразовая или многократная).

Для целенаправленного поиска материала электродов, обеспечивающих создание поверхностного слоя с заданными свойствами, предлагается использовать алгоритм, в основу которого положен метод последовательного приближения. В качестве функции отклика он позволяет использовать: сравнительную износ-, жаро- и коррозионную стойкость; твердость; учитывать наличие и процентное содержание карбидной фазы, ее видовой состав и процентное соотношение различного типа карбидов; наличие и состав интерметаллидов. С его помощью осуществляется выбор материалов электродов в зависимости от конкретных требований к служебным свойствам деталей (рис. 1).

Согласно алгоритму, вначале из известных сплавов выбирают базовый материал электрода, обеспечивающий метастабильный фазовый состав, например сплав с повышенным содержанием Cr или Ni. Осуществляют им ЭИЛ образцов и определяют полученный химический и фазовый состав легированного слоя. Далее проводят испытания образцов на стойкость в условиях, моделирующих условия работы реальных деталей.

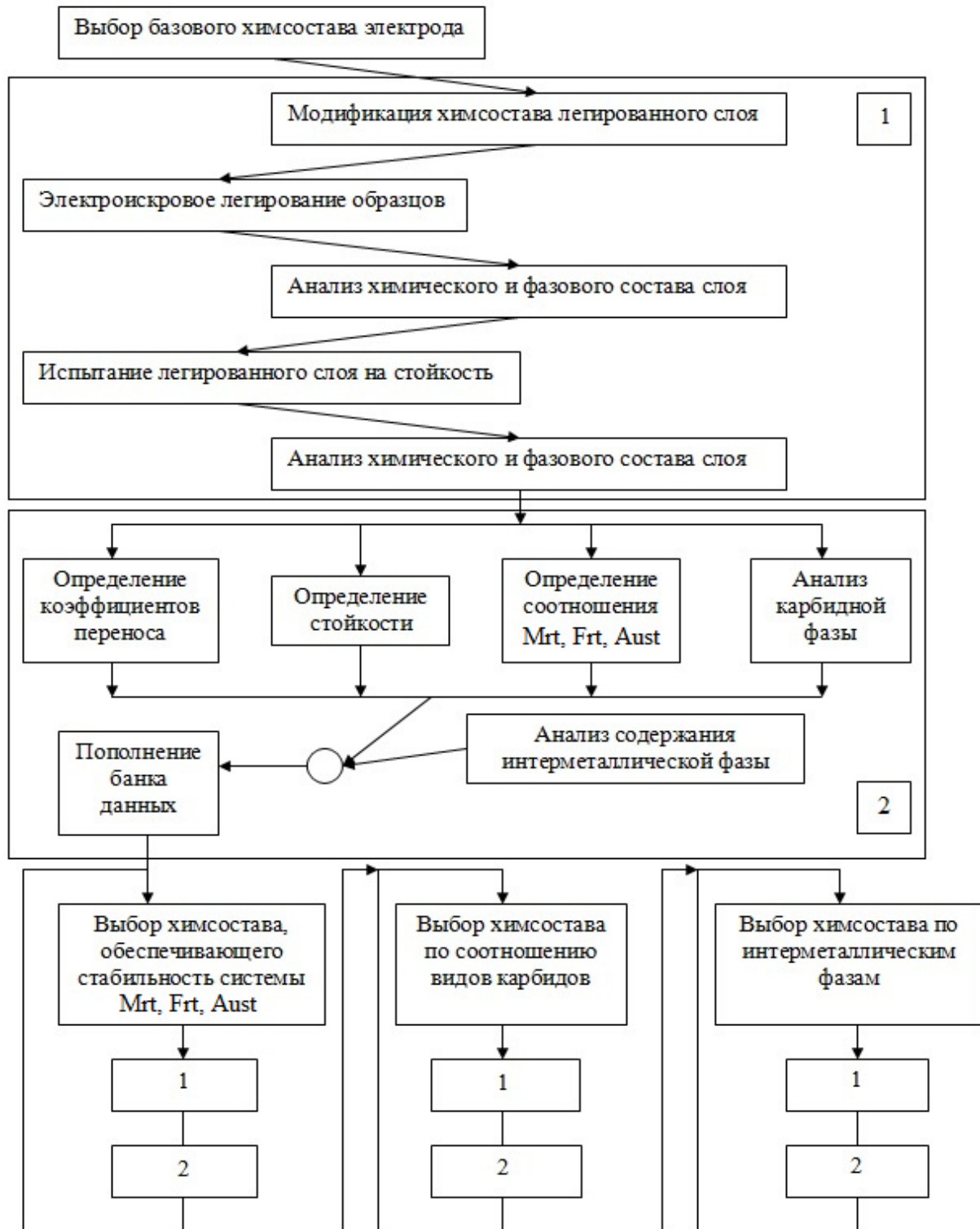


Рис. 1. Алгоритм выбора материала электрода

После каждого цикла испытаний проводят сравнения соотношения  $Mrt$ ,  $Frt$ ,  $Aust$  и исходного состояния. В зависимости от полученных результатов корректируют первоначальный материал электрода путем дополнительного введения или повышения процентного содержания элементов, способствующих выклиниванию  $\alpha$ - или  $\gamma$ -фазы.

Таким образом, после ряда последовательных приближений достигают стабилизации данной системы. Аналогичным образом осуществляют уточнение химического состава электрода с требуемым соотношением вида карбидов и интерметаллидов.

### Выводы

Физические процессы, протекающие при ЭИЛ, обеспечивают создание условий, предотвращающих такие агрессивные виды износа, как абразивный и схватывание. При этом живучесть легированного слоя определяется развитием усталостных процессов. Это ограничивает повышение его износостойкости более чем в 2 раза по сравнению с исходным материалом. Для повышения служебных свойств деталей необходимо осуществлять обработку таким материалом электрода, который обеспечит формирование в поверхностном слое метастабильных структур, способных под воздействием давления и температурного очага трения к многократным фазовым превращениям. Для поиска таких материалов электродов разработан алгоритм, основанный на методе последовательного приближения.

### Литература

1. Пантелеенко Ф.И., Лялякин В.П., Иванов В.П., Константинов В.М. (2003). Восстановление деталей машин: справочник. Москва: Машиностроение.
2. Лебедева А.П., Погорелова Т.Н. (2003). Восстановление деталей машин: справочник. Москва: Наука.
3. Derbaba V.A., Zil V.V., Patsera S.T. (2014). Evaluation of the adequacy of the statistical simulation modeling method while investigating the components presorting processes. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (5), 45–50.
4. Кіянівський М.В., Цивінда Н.І. (2011). Електрофізичні та електромеханічні методи обробки поверхонь у машинобудуванні: навч. посіб. Кривий Ріг: Видавничий центр КТУ.
5. Тарельник В.Б. (1997). Комбинированные технологии электроэрозионного легирования. Киев: Техника.
6. Богданов А.А., Загора В.В. Выбор рациональной стратегии измерения деталей на координатно-измерительной машине Mora Primus 564 // *Збірник наукових праць НГУ*. – Дніпро: Національний ТУ «Дніпровська політехніка», 2019. – № 57. – С. 88–96.
7. Zhuravel O.Yu., Derbaba V.A., Protsiv V.V., Patsera S.T. (2019). Interrelation between Shearing Angles of External and Internal Friction During Chip Formation. *Solid State Phenomena. Materials Properties and Technologies of Processing*, (291), 193–203. – 2019. – doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.291.193.
8. Дідик Р.П., Кузнецов Є.В., Забара В.М. (2005). *Фізичні основи міцності: підручник*. Дніпро: Наука та освіта.
9. Zhu L., Li H., Wang W. Research on rotary surface topography by orthogonal turn-milling // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2013. – Т. 69. – №. 9–12. – С. 2279–2292.
10. Верхотуров А.Д., Николенко С.В. (2010). Классификация, разработка и создание электродных материалов для электроискрового легирования. Упрочняющие технологии и покрытия, (2), 13–22.
11. Savas V., Ozay C. Analysis of the surface roughness of tangential turn-milling for machining with end milling cutter // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2007. – Т. 186. – №. 1. – С. 279–283.

### References

1. Panteleyenko F.I., Lyalyakin V.P., Ivanov V.P., Konstantinov V.M. (2003). Vosstanovleniye detaley mashin [Recovery of machine parts]: Directory. Moskva: Engineering.
2. Lebedeva A.P., Pogorelova T.N. (2003). Vosstanovleniye detaley mashin [Recovery of machine parts]: Directory. Moskva: Science.
3. Derbaba V.A., Zil V.V., Patsera S.T. (2014). Evaluation of the adequacy of the statistical simulation modeling method while investigating the components presorting processes. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (5), 45–50.
4. Kiyanovsky M.V., Tsivinda N.I. (2011). Electronic and electrical methods of surface processing in machinebuduvanni [Electrical and electrical methods of surface processing in machine blowing]: Study guide. Kriviy Rig: The prominent center of KTU.
5. Tarel'nik V.B. (1997). Kombinirovannyye tekhnologii elektroerozionnogo legirovaniya [Combined technology EDM doping]. Kyiv: Technics.
6. Bogdanov A.A., Zakora V.V. Vybora ratsional'noy strategii izmereniya detaley na koordinatno-izmeritel'noy mashine Mora Primus 564 [Choosing a rational strategy for measuring parts on a Mora Primus 564 coordinate measuring machine] // *Zbirnik naukovykh prrats NMU*. – Dnipro: National Technical University «Dnipropetrovsk Polytechnic», 2019. – № 57. – P. 88–96.
7. Zhuravel O.Yu., Derbaba V.A., Protsiv V.V., Patsera S.T. (2019). Interrelation between Shearing Angles of External and Internal Friction During Chip Formation. *Solid State Phenomena. Materials Properties and Technologies of Processing*, (291), 193–203. – 2019. – doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.291.193
8. Didyk R.P., Kuznetsov E.V., Zabara V.M. (2005). Fizichni basis mitsnosti [Physical basis of strength]: Textbook. Dnipro: Science and education.
9. Zhu L., Li H., Wang W. Research on rotary surface topography by orthogonal turn-milling // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2013. – Т. 69. – №. 9–12. – С. 2279–2292.

10. Verkhoturov A.D., Nikolenko S.V. (2010). Klasifikatsiya, rozrobotka i sozdaniye elektrodnykh materialov dlya elektroiskrovogo legirovaniya [Classification, development and creation of electrode materials for spark sparking]. *Hardening Technologies and Coatings*, (2), 13–22.
11. Savas V., Ozay C. Analysis of the surface roughness of tangential turn-milling for machining with end milling cutter // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2007. – Т. 186. – №. 1. – С. 279–283.

**Богданов Александр Александрович**, к.т.н., доцент кафедри технологій машиностроєння і матеріалознавства, +38(050)6546886, [bogdanov.aleksandr17@gmail.com](mailto:bogdanov.aleksandr17@gmail.com), Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», 19, пр. Д. Яворницького, г. Дніпро, 49005, Україна.

**Протсів Володимир Васильевич**, д.т.н., професор, кафедри технологій машиностроєння і матеріалознавства, +38(050)3203410, [protsiv@ukr.net](mailto:protsiv@ukr.net), Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», 19, пр. Д. Яворницького, г. Дніпро, 49005, Україна.

**Пацера Сергей Тихонович**, к.т.н., професор, кафедри технологій машиностроєння і матеріалознавства, +38(068)5791430, [sergiy.patsera@ukr.net](mailto:sergiy.patsera@ukr.net), Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», 19, пр. Д. Яворницького, г. Дніпро, 49005, Україна.

**Дербаба Віталій Анатольевич**, к.т.н., доцент, кафедри технологій машиностроєння і матеріалознавства, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», +38(096)9548210, [5762634@gmail.com](mailto:5762634@gmail.com), 19, пр. Д. Яворницького, г. Дніпро, 49005, Україна.

#### Algorithm of electrode material selection during electrical erosion alloying

**Purpose.** The purpose is improving the quality of the surface layer of new and renewable machine parts by doping. Development of an algorithm for selecting electrode material for electric-spark doping of parts based on the method of successive approximation.

**Research methods** were based on existing technological methods and equipment that allow the process of electric-spark doping to be carried out with a given thickness of the surface layer of the part. The following factors are used as controlling factors in creating such a layer: the electric processing mode, the chemical elements introduced into the composition of the doped layer, and their percentage, as well as the technological processing scheme (disposable or reusable). **Research results.** The method of electrical erosion alloying doping in its advantages surpasses such methods of restoring worn surfaces of parts such as detonation-gas and vacuum-plasma treatment, surfacing, electroplating, metallization by sputtering. Special equipment allows to carry out electric-spark doping with any given continuity of the

surface layer and to increase the productivity of the process. When electrical erosion alloying is doping with an electrode containing refractory elements and their compounds, the conditions preventing the setting of the first and second kinds are fulfilled, since doping with these elements raises the melting point of the starting material, and the formation of a three-dimensional cellular substructure promotes an increase in the creep temperature. **Scientific novelty.** For the first time, a rational algorithm is proposed for selecting electrode material based on the method of successive approximation. After a series of successive approximations, stabilization of the phase composition of the system is achieved and the chemical composition of the electrode is refined with the required ratio of the type of carbides and intermetallic compounds. **Practical value.** The use of electrical erosion alloying doping in the restoration of parts will provide an increase in wear resistance and heat resistance of the processed surfaces by 1,5–2 times in industry. As a result of electrical erosion alloying doping with the most common electrodes of the type VK and TK, conditions that prevent the occurrence of abrasive wear and seizure are automatically fulfilled. **Key words:** electrical erosion alloying, electrode, component reconditioning.

**Bohdanov Oleksandr**, Candidate of technical Sciences, Associate Professor of the Department of Materials Science and Mechanical Engineering Technologies, Dnipro University of Technology, +38(050)6546886, e-mail: [bogdanov.aleksandr17@gmail.com](mailto:bogdanov.aleksandr17@gmail.com), Dmytra Yavornytskoho Ave, 19, Dnipro, 49005, Ukraine.

**Protsiv Volodymyr**, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Materials Science and Mechanical Engineering Technologies, Dnipro University of Technology, +38(050)3203410, e-mail: [protsiv@ukr.net](mailto:protsiv@ukr.net), Dmytra Yavornytskoho Ave, 19, Dnipro, 49005, Ukraine.

**Patsera Sergey**, Candidate of technical Sciences, Professor of the Department of Materials Science and Mechanical Engineering Technologies, Dnipro University of Technology, +38(068)5791430, e-mail: [sergiy.patsera@ukr.net](mailto:sergiy.patsera@ukr.net), Dmytra Yavornytskoho Ave, 19, Dnipro, 49005, Ukraine.

**Derbaba Vitalii**, Candidate of technical Sciences, Associate Professor of the Department of Materials Science and Mechanical Engineering Technologies, Dnipro University of Technology, +38(096)9548210, e-mail: [5762634@gmail.com](mailto:5762634@gmail.com), Dmytra Yavornytskoho Ave, 19, Dnipro, 49005, Ukraine.

#### Алгоритм вибору матеріалу електрода за умови електроіскрового легування деталей

**Анотація. Мета.** Підвищення якості поверхневого шару нових і відновлюваних деталей машин легуванням. Розроблення алгоритму вибору матеріалу електрода для електроіскрового легування деталей на основі методу послідовного наближення. **Методи досліджень** ґрунтувалися на наявних технологічних прийомах і устаткуванні,

які дозволяють здійснити процес електроіскрового легування із заданою товщиною поверхневого шару деталі. Керувальними чинниками в створенні такого шару використовуються: електричний режим оброблення, хімічні елементи, що вводяться до складу легovanого шару, та їх відсотковий вміст, а також технологічна схема оброблення (одноразова або багаторазова). **Результати досліджень.** Метод електроіскрового легування за своїми перевагами перевершує такі способи відновлення зношених поверхонь деталей, як детонаційно-газове та вакуумно-плазмове оброблення, наплавлення, гальванопокриття, металізація напиленням. Спеціальне обладнання дозволяє здійснити електроіскрове легування з будь-якої заданої суцільністю поверхневого шару і підвищити продуктивність процесу. У разі електроіскрового легування електродом, що містить тугоплавкі елементи та їхні сполуки, виконуються умови, що запобігають схоплюванню першого та другого роду, оскільки легування цими елементами підвищує температуру плавлення вихідного матеріалу, а утворення тривимірної коміркової субструктури сприяє підвищенню температури повзучості. **Наукова новизна.** Уперше запропоновано раціональний алгоритм вибору матеріалу електрода на основі методу послідовного наближення. Після низки послідовних наближень досягають стабілізації фазового складу системи й уточнюють хімічний склад електрода з необхідним співвідношенням виду карбідів та інтерметалідів. **Практичне значення.** Застосування електроіскрового легування для відновлення деталей у промисловості

забезпечить підвищення зносостійкості та жаростійкості оброблених поверхонь в 1,5–2 рази. Унаслідок електроіскрового легування найбільш поширеними електродами типу ВК і ТК автоматично виконуються умови, що запобігають появі абразивного зношування та схоплювання.

**Ключові слова:** електроіскрове легування, електрод, відновлення деталей.

**Богданов Олександр Олександрович**, к.т.н., доцент кафедри технологій машинобудування та матеріалознавства, +38(050)6546886, e-mail: [bogdanov.aleksandr17@gmail.com](mailto:bogdanov.aleksandr17@gmail.com), НТУ «Дніпровська політехніка», 19, пр. Д. Яворницького, м. Дніпро, 49005, Україна.

**Проців Володимир Васильович**, д.т.н., професор кафедри технологій машинобудування та матеріалознавства, НТУ «Дніпровська політехніка», +38(050)3203410, [protsiv@ukr.net](mailto:protsiv@ukr.net), НТУ «Дніпровська політехніка», 19, пр. Д. Яворницького, м. Дніпро, 49005, Україна.

**Пацера Сергій Тихонович**, к.т.н., професор кафедри технологій машинобудування та матеріалознавства, НТУ «Дніпровська політехніка», 19,+38(068)5791430, [sergij.patsera@ukr.net](mailto:sergij.patsera@ukr.net), НТУ «Дніпровська політехніка», 19, пр. Д. Яворницького, м. Дніпро, 49005, Україна.

**Дербаба Віталій Анатолійович**, к.т.н., доцент кафедри технологій машинобудування та матеріалознавства, НТУ «Дніпровська політехніка», +38(096)9548210, [5762634@gmail.com](mailto:5762634@gmail.com), НТУ «Дніпровська політехніка», 19, пр. Д. Яворницького, м. Дніпро, 49005, Україна.

---