

ЛИТЕРАТУРА

1. Передрей, Ю. М. Технология машиностроительного производства. Ч. 1, Теоретические основы технологии машиностроения: учебное пособие. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. технол. академии, 2005. – 236 с.
2. Дальский, А. М. Технология конструкционных материалов / А. М. Дальский, Т. М. Барсукова, Л. Н. Бухаркин. – М.: Машиностроение, 2004. – 512 с.
3. Кривко, Г. П. Основы совершенствования способов и технологических процессов механической обработки деталей подшипников. – Мн.: УП «Технопринт», 2001. – 220 с.
4. Ярушин, С. Г. Технологические процессы в машиностроении: учебник для бакалавров / С. Г. Ярушин. – М.: Издательство Юрайт, 2014. – 564 с.

УДК 621.9.048.4

ИСТОРИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ ЭЛЕКТРОИСКРОВОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

*А. И. Комлик, студент группы 10505120 ФММП БНТУ,
научный руководитель – докт. техн. наук, доцент Н. М. Чигринова*

Резюме – в статье проанализированы достижения в области электроискровой обработки, специализированного оборудования, о приемах, повышающих эффективность и качество нанесения покрытий. Произведен анализ истории и выявлены общие тенденции усовершенствования процесса электроискровой обработки.

Resume – the article provides information on the development of modern technologies for electro spark alloying, specialized equipment, and techniques that increase the efficiency and quality of coatings. The history was analyzed and general changes in the electric spark machining process were identified.

Введение. Технологии металлообработки с использованием электрических разрядов в сочетании с механическим воздействием широко востребованы в целом ряде современных производств и применяются как для обработки металлических изделий с целью наделения их новыми свойствами, так и для ремонтных операций по восстановлению изношенных поверхностей [1–3]. Электрофизические методы основаны на одновременном механическом и электрическом воздействии на материал в зоне обработки, лучевые методы связаны с обработкой материалов электронным пучком и световыми лучами и др. Одной из наиболее востребованных в целом ряде производств по упрочнению и восстановлению изношенных поверхностей технологий является технология электроискрового легирования – ЭИЛ. Этот малоэнергоёмкий и недорогой метод, основанный на явлении электрической эрозии и массопереносе материала анода (инструмента) на катод (подложку) при возникновении импульсных разрядов в газовой среде, обеспечивает легирование поверхностного слоя катода элементами материала анода, обуславливая из-

менение его состава, размерных параметров и свойств [1–4]. Технология ЭИЛ проста в эксплуатации, а необходимое оборудование может быть малогабаритным, надежным и легко транспортируемым. Также важно отметить очень низкую энергозатратность процесса по сравнению с традиционными методами обработки, такими как электронаплавка, электродуговая металлизация, плазменное напыление и т. д.

Основная часть. К основным особенностям данного метода относятся универсальность, т. е. возможность обработки любых токопроводящих поверхностей произвольных размеров практически любыми по составу анодами для реализации требуемых свойств, высокая адгезия наносимого материала и его термоударная стойкость вследствие интенсивного отвода тепла из контактной зоны, простота в обработке и варьирование ее режимов с целью изменения толщины и шероховатости легируемой поверхности [5]. Технология ЭИЛ была создана нашими соотечественниками Б. Р. Лазаренко и Н. Е. Лазаренко в начале 20 столетия на основе проведенных ранее исследований многих ученых. Роберт Бойль (1675 г.) [6], Бенджамин Франклин (1751 г.) [7], Джозеф Пристли (1767 г.) [8], Георг Кристиан Лихтенберг (1777 г.), изучавшие действие электроразрядов на материал, впервые зафиксировали ряд сопровождающих их эффектов [9]. В 1938 году английским ученым Филипсом и советским инженером Л. А. Юткиным был открыт эффект формообразующих гидравлических ударов, порождаемых непрерывной серией электроискровых разрядов. Это явление было положено в основу электроискровой штамповки металлов, ставшей после электродуговой сварки, следующим этапом в развитии технологических методов формообразования с помощью электрических разрядов [10].

В 1941 году ученые Б. Р. Лазаренко и Н. Е. Лазаренко установили, что электрические разряды, создаваемые импульсами определенной формы тока, способны направленно разрушать электроды. Это послужило импульсом к созданию и развитию известного сегодня электроискрового метода [4]. Ученые отметили, что форма разряда и его интенсивность могут либо направлять потоки возникающих при прохождении тока мощных разрядов, способных направленно изменять конфигурацию и размеры обрабатываемой поверхности, либо, при регулировании мощности этих потоков возможно осуществлять «ювелирную» обработку материала. Кроме того, в процессе экспериментов было зафиксировано, что при разрядке энергия конденсаторов импульс электрического тока на короткое время (обычно 1–10 мкс) создает плазменную дугу с температурой 5 000–25 000 °С между кончиком анода и поверхностью катода в зависимости от природы используемого защитного газа и тока, проводимого плазмой. Генерируемая электрическая дуга способна плавить и испарять небольшую долю материала как основы, так и электрода. Расплавленные капли электрода под действием электрического поля перемещаются и ускоряются по направлению к подложке, где они разбиваются, образуя покрытие с высокой адгезией к металлической основе. Массоперенос и осе-

дание расплавленной капли анода на поверхности катода осуществляется в течение малой длительности импульсов в несколько микросекунд и частоте в диапазоне от 0,1 до 2 кГц, что позволяет рассеивать 99 % выделяемого тепла в течение рабочего цикла. Поэтому средняя температура обрабатываемой поверхности обычно не превышает 80 °С. Чтобы избежать сваривания взаимодействующих электродов при ЭИЛ анод в конструкции специализированных установок придавалось вращение или вибрация. Когда расходуемый электрод находится в подвижном контакте с подложкой, возникает короткое замыкание, приводящее к разрядке батареи конденсаторов посредством последовательности коротких электрических искр при низком напряжении и большом токе. В результате происходит отрыв капель анода, возникающих в микронных зазорах, заполненных диэлектрическим газом.

В конструкциях первых специализированных установок для ЭИЛ наряду с конденсаторными источниками питания, в которых с целью преобразования переменного тока в постоянный был предусмотрен выпрямитель, необходимый для зарядки конденсаторов, и электрододержатель для анода (аппликатор). Для разряда конденсаторов в источнике питания использовали резистор-конденсатор или разрядную схему, управляемую микропроцессором.

Электрическая цепь между анодом (положительным электродом) и катодом (заготовкой), содержит заземляющий кабель, подключенный к катоду. Кроме того, к электрододержателю бывает подключен источник подачи инертного газа (аргона, гелия, углекислого газа или смеси этих газов), обеспечивая постоянную его циркуляцию над местом осаждения капель анода на поверхность катода и гарантируя тем самым охлаждение контактной зоны, влияя на физические свойства дуги и на характеристики покрытия [4; 5]. Как и всякая технология, ЭИЛ, обладая рядом несомненных достоинств, содержит и недостатки. Основной из них – низкая стабильность массопереноса. Это приводит к образованию неоднородных по составу и неравнотолщинных слоев покрытия, кратерной эрозии и высокой шероховатости поверхности формируемых покрытий [2; 5]. Нестабильность процесса можно объяснить неравномерным массопереносом и исходным рельефом обрабатываемой поверхности. При отсутствии подаваемого инертного газа в контактные области размер расплавленных капель увеличивается, что приводит к формированию неоднородного по структуре и свойствам покрытия. Данный эффект обусловлен тем, что плазма с высокой теплопроводностью, генерируемая молекулярными газами (т. е. азотом и кислородом), способствует механизму массопереноса глобулярного/спрейного типа. В отличие от осаждения, выполняемого на воздухе, осаждение, выполняемое в присутствии защитного газа (Ar), приводит к более точному осаждению и созданию однородной поверхности, благодаря образованию капель меньшего размера по сравнению с каплями, генерируемыми в присутствии воздуха. Нестабильность процесса ЭИЛ может быть

вызвана условиями возникновения различных по интенсивности разрядов вследствие неравномерной геометрии контактной поверхности в зоне разряда, а также изменением конфигурации контактной поверхности легирующего анода. Нестабильность процесса также может быть связана с нерегулярными контактами электродов, что может вызвать возникновение весьма вредных переходных дуг, приводящих к высокой передаче энергии и перегреву электродов и неоднородности электрического поля. Эти явления, как правило, сопровождаются явлениями частичного или полного разряда. К перспективам данного метода следует отнести совершенствование специализированного оборудования, в результате чего удастся на обрабатываемых поверхностях создавать покрытия в наноструктурном состоянии. Нанокристаллические структуры, также известные как «сверхмелкозернистые структуры», представляют собой одно- или многофазные поликристаллы с наноразмерными зёрнами (250–1000 нм). В таком состоянии структуры в материале активно протекают диффузионные процессы, обуславливающие повышенные прочность и твердость, пониженные модуль упругости и пластичность, повышенный коэффициент термического расширения и более высокую удельную теплоемкость, чем обычные материалы [11]. Ванг и др. в своих работах показали [12], что нанокристаллы могут быть легко использованы для существенного улучшения микроструктуры электродного материала Al–17 Si. В частности, по сравнению со средним размером первичных частиц Si в литом электроде (60 ± 37 мкм) они обнаружили, что после осаждения нанокристаллов размер первичных частиц Si уменьшился до 256 ± 68 нм. Как правило, покрытия Al–Si являются очень эффективными, ибо они состоят из дисперсных частиц сферической формы, уменьшающих склонность к микротрещинам. В то же время кремний, распределенный в виде покрытия Al–Si по всей алюминиевой матрице методом электроискровой обработки, обеспечивает превосходную износостойкость и большую стойкость к кавитационной эрозии такой матрицы, чем литая заготовка из сплава Al–Si.

Совершенно естественно, что материалы с таким уровнем свойств все более становятся востребованными в различных отраслях промышленности. Такие материалы с нанокристаллической микроструктурой стали объектом многих исследований в течение последних нескольких десятилетий, при этом был достигнут значительный прогресс в их понимании, особенно в последние годы. Еще один перспективный путь совершенствования метода ЭИО – вариации напряжения при работе оборудования. Известно [5], что, уровень дефектов снижается, если расстояние между частями формируемого покрытия уменьшается по мере увеличения энергии искры. Кроме того, более высокие значения напряжения позволяют перенести большее количество легирующего материала, уменьшая или полностью устраняя неровность и шероховатость обработанной поверхности. Было определено, что процент дефектов внутри покрытий существенно не меняется, если V поддерживается постоянным, а при его увеличении процент дефектов зна-

чительно снижается. Так в покрытиях состава Ni-Cr-Al-Y, нанесенных на металлическую поверхность, было обнаружено, что минимальная плотность дефектов достигается при низких энергетических уровнях.

Наиболее эффективным способом повышения производительности ЭИО и улучшения качества формируемых покрытий является ультразвуковое воздействие. Было проведено сравнительное исследование свойств поверхности между образцом, обработанным ЭИЛ с дополнительным ультразвуковым воздействием – ЭИО с УЗВ [13], и образцом, после ультразвуковой ударной обработки – УУО. В результате было установлено, что после ЭИО с УЗВ было сформировано покрытие увеличенной толщины с мелкозернистой микроструктура и более высокой на 65,1 % твердостью поверхности. Глубина закаленного слоя достигла 55 мкм, а шероховатость поверхности снизилась на 79,6 %, потеря объема при износе уменьшилась.

Заключение. За последние десятилетия были проведены значительные по объему исследования электроискровых технологий, благодаря заметному интересу со стороны крупных отечественных предприятий и иностранных производственных холдингов, включая компании General Electric, Prattand Whitney, Rolls Royce Corporation, Aircraft Engines, General Electric Power Systems. Создание серийных моделей специализированного электроискрового оборудования и их совершенствование привело к использованию этой технологии для нанесения покрытий на поверхности деталей различного назначения, размеров и конфигурации. Выбор режимов обработки и составов легирующих анодов определяются назначением обрабатываемых изделий. Так, сегодня данным методом обрабатывают некоторые комплектующие ядерных реакторов, создают износостойкие покрытия на поверхностях деталей, подвергаемых интенсивным абразивно-механическим воздействиям в самых разных отраслях промышленности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чигринова, Н. М. Перспективы интенсификации микроплазменного упрочнения и восстановления металлических изделий повышенной точности энергомеханическим воздействием / Н. М. Чигринова и др. // Книга: 50 лет порошковой металлургии Беларуси. История, достижения, перспективы.– Мн., 2010. – С. 517–540.
2. Чигринова, Н. М. Моделирование процесса энергомеханической интенсификации микроплазменной обработки в газовой среде / Н. М. Чигринова // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – Мн., 2020. – № 1. – С. 67–74.
3. Чигринова, Н. М. Механизмы структурообразования в электроискровых покрытиях при изменяющейся интенсивности и очередности электро-механических воздействий / Н. М. Чигринова, С. И. Ловыгин // Межрегиональный сборник научных статей «Вестник машиностроения». – Вып. 32. – Мн., 2020. – С. 58–62.

4. Лазаренко, Б. Р. Электрическая теория искровой электрической эрозии металлов / Б. Р. Лазаренко, Н. И. Лазаренко // Проблемы электрической обработки материалов. – М.: Изд-во АН СССР, 1962. – С. 44–51.
5. Чигринова, Н. М. Инновации в электроискровых технологиях: теория и практика / Н. М. Чигринова // монография. – Мн.: Бестпринт, 2018. – 263 с.
6. Робет Бойль. Experiments and notes about the mechanical origine or production of corrosiveness and corrosibility by the Honourable Robert Boyle. – London, 1675.
7. Benjamin Franklin. Experiments and Observations on Electricity, made at Philadelphia in America, 1751.
8. Joseph Priestley The History and Present State of Electricity. – London: Printed for J. Dodsley, J. Johnson and T. Cadell, 1767.
9. Georg Christoph Lichtenberg. De Nova Methodo Naturam Ac Motum Fluidi Electrici Investigandi / Göttinger Novi Commentarii, Göttingen, 1777.
10. Phillips, A. L. Welding Handbook, 6 th ed.; Chapter 3; American Welding Society Miami, FL, USA, 1968. – P. 20–28.
11. Чигринова, Н. М. Влияние периодического ультразвукового воздействия на интенсификацию динамики массопереноса и прирост толщины формируемых электроискровых покрытий / Н. М. Чигринова, С. И. Ловыгин // Новые материалы и технологии: Порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка. – Мн.: 2022. – С. 573–577.
12. Wang, W. F.; Microstructure and cavitation erosion characteristics of Al–Si alloy coating prepared by electrospark deposition. / W. F. Wang, M. C. Wang, F. J. Sun, Y. G. Zheng,; J. M. Jiao, Surf. Coat. – Technol. 2008.
13. Чигринова Н. М., Кулешов А. А., Нелаев В. В. Микроплазмоискровое легирование с ультразвуковым модифицированием поверхности / Н. М. Чигринова и др. // Электронная обработка материалов. – НАН Молдовы. – Кишинев, 2010. – № 2 (262). – С. 27–34.

УДК 004.891

ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

***А. В. Лесоцкая, П. М. Севастьянова, студенты группы 10503122 БНТУ,
научный руководитель – канд. техн. наук О. В. Дьяченко***

Резюме – в научной работе рассказывается о том, что же такое ИИ, почему искусственный интеллект полезен для промышленности и для каких производственных процессов его используют. Также в работе представлено как искусственный интеллект используют в промышленности в Республике Беларусь.