

УДК 621.785

doi: 10.18698/0536-1044-2020-10-47-53

Поверхностная фрикционно-электрическая обработка алюминиевых сплавов

В.Р. Эдигаров

Омский автобронетанковый инженерный институт

Surface Friction-Electric Treatment of Aluminum Alloys

V.R. Edigarov

Omsk Armored Vehicle Engineering Institute

Рассмотрена фрикционно-электрическая обработка поверхностных слоев деталей из алюминиевых сплавов, являющаяся комбинацией фрикционной и электромеханической обработок. Основным технологическим фактором такой обработки служит температура, выделившаяся в процессе трения, а дополнительным источником тепла — теплота, выделившаяся в процессе прохождения электрического тока через локальный объем фрикционно-термического воздействия. Приведены результаты исследований технологического способа поверхностного модифицирования фрикционно-электрической обработкой сплавов из алюминия с армированием частицами оксида алюминия. Варьируемыми технологическими факторами являлись плотность электрического тока, усилие прижатия и форма рабочей зоны инструмента, скорость обработки. Для фрикционно-электрической обработки использован твердосплавный инструмент с высокими показателями температуростойкости, установленный в оправку специальной конструкции, способный подавать в зону обработки модификатор — смесь частиц оксида алюминия с поверхностно-активным веществом. Фрикционно-электрическая обработка поверхностного слоя образцов с армированием частицами оксида алюминия дала возможность увеличить его твердость (примерно на 30...40 %) и толщину упроченного слоя (в 3–5 раз), что связано с локальным деформированием и прохождением электрического тока через зону обработки, а также повысить износостойкость поверхностного слоя.

Ключевые слова: фрикционная обработка, фрикционно-электрическая обработка, электромеханическая обработка, поверхностное модифицирование

This paper examines a combined friction-electric treatment of surface layers of machine parts made of aluminum alloys. The temperature released during the friction process is the main technological factor of the treatment, and the heat released during the passage of electric current through the local volume of friction-thermal action is an additional heat source. The paper presents the results of studying a surface modification method involving friction-electric treatment of aluminium alloys with reinforcement by aluminium oxide particles under varied technological conditions: density of electric current, pressing force of the tool, shape of the tool working zone and speed of treatment. A hard alloy tool with high temperature resistance was used as a tool for friction-electric treatment. The tool was installed in a mandrel of a special design allowing supply of a modifier representing a mixture of aluminium oxide particles with a surfactant to the treatment zone. Using the friction-electric treatment of the surface layer of samples with reinforcement by aluminum oxide particles it was possible to increase the surface hardness by about 30–40 % and thickness of the hardened layer by 3–5 times due to the local deformation and passage of electric current through the treatment zone, and to improve wear resistance of the surface layer.

Keywords: friction treatment, friction-electric treatment, electromechanical treatment, surface modification

Одним из резервов повышения эксплуатационных свойств поверхностных слоев деталей, изготовленных из алюминиевых сплавов, является поверхностное модифицирование с созданием нанокристаллических структур, имеющих уникальные физико-механические свойства. Поверхностное модифицирование различными способами интенсивного воздействия высококонцентрированными источниками энергии позволяет получить высокопрочные поверхностные слои. К эффективным способам поверхностного модифицирования относятся фрикционная обработка (ФО) [1, 2], электро-механическая обработка (ЭМО) [3, 4] и комбинированная фрикционно-электрическая обработка (ФЭО) [5].

В процессе ЭМО нагрев зоны контакта осуществляется за очень короткий промежуток времени. При этом анализ теплового баланса показал, что общее количество теплоты складывается из теплоты, выделяемой проходящим электрическим током, Q_1 и теплоты от трения инструмента об обрабатываемую поверхность Q_2 [3, 6]:

$$Q_{\text{ЭМО}} = Q_1 + Q_2.$$

С учетом потерь во вторичной электрической цепи

$$Q_1 = 0,24\eta IU\tau,$$

где η — коэффициент, учитывающий потери электрического тока во вторичной цепи; I — сила тока во вторичной цепи, А; U — напряжение вторичной цепи, В; τ — время обработки, с.

Для ЭМО теплота от трения инструмента об обрабатываемую поверхность определяется эмпирическим выражением [3, 7]

$$Q_2 = PHf/102,$$

где P — усилие прижатия инструмента к обрабатываемой поверхности; H — высота высокотемпературной зоны; f — коэффициент трения скольжения при установившемся процессе.

Основным источником тепла в процессе ФЭО или трибоэлектрической обработки [5, 8], включающей в себя ФО и ЭМО, является теплота от трения рабочего инструмента об обрабатываемую поверхность [9]. При этом теплота, выделившаяся в процессе прохождения электрического тока, лишь способствует модифицированию поверхностного слоя детали, что отличает такой способ обработки от классической ЭМО.

Дальнейшим развитием технологии ФЭО стало модифицирование поверхности при обработке твердыми частицами (ТЧ) с образованием упрочняющей матрицы [10–12]. В этом случае наибольший эффект позволяют получить твердые материалы типа SiC и Al₂O₃, а также углеродные нанотрубки, нанопорошки и наноалмазы.

Модифицирование поверхности указанными частицами увеличивает поверхностную микротвердость, что связано с локальным деформированием, которое в свою очередь образует дислокационный барьер в процессе упрочнения. При этом пластичность основного металла остается практически без изменений, наблюдается возрастание износостойкости поверхностного слоя.

Кроме того, ФЭО позволяет значительно увеличить долговечность рабочего инструмента, так как обработка поверхности осуществляется при теплоте, образованной проходящим через зону обработки электрическим током, способствующего повышению пластичности поверхностного слоя металла и снижению его механической прочности и сопротивления внедрения в поверхность армирующих ультрадисперсных ТЧ модификатора [10–12].

Для ФЭО с модифицированием поверхностного слоя частицами твердого материала характерен ряд недостатков и прежде всего неравномерное распределение ТЧ в модифицированном поверхностном слое. Для устранения этого недостатка поверхность необходимо обрабатывать многократно (несколькими проходами) или интенсифицировать воздействие рабочего инструмента на нее (увеличивать скорость его вращения, подбирать форму рабочей части его поверхности и т. д.), а также обеспечивать равномерную подачу твердого материала непосредственно в зону термомодеформационного воздействия с целью достижения большей эффективности в перемешивании и распределении ТЧ и массы основного материала [13, 14].

Присутствие электрического тока в локальном объеме поверхностного слоя способствует выделению джоулева тепла и повышению пластичности основного материала, тем самым обеспечивая более равномерное распределение армирующих поверхностный слой частиц твердого материала, более легкое их проникновение в поверхностный слой, увеличение зоны обработки и износостойкости рабочего инструмента [15].

Цель работы — проведение экспериментальных исследований для подтверждения эффективности разработанных способа модифицирования поверхностного слоя деталей и средств технологического оснащения.

В качестве образцов для обработки использованы пластины, изготовленные из алюминиево-магниевого сплава АМг4,5 (ГОСТ 21631–76), толщиной 10 мм.

По предложенной схеме разработано устройство — инструмент для ФЭО (рис. 1), состоящий из державки 3, фланца-инструмента 1, крепежных элементов 2, изоляционной втулки 4. Державка изготовлена из инструментальной легированной стали 4Х5МФ1С, фланец-инструмент из вольфрамо-кобальтового твердого сплава ВК-8.

В державке и фланце-инструменте есть осевой канал O диаметром d' , через который в зону фрикционно-электрического контакта подается модификатор — смесь ТЧ и поверхностно-активного вещества (ПАВ). В торцовой части фланца-инструмента диаметром d имеются рабочие гребни и канавки. Через канавки осуществляется подача ТЧ в смеси с ПАВ непосредственно в зону фрикционно-электрического контакта гребней торцовой поверхности фланца-инструмента и обрабатываемой поверхности 6 (рис. 2).

Электрический ток подается от источника тока 5 посредством установленных в стаканы 4

скользящих меднографитовых контактов 2 с пружинами 3 через державку на фланец-инструмент и обрабатываемую деталь, тем самым замыкая электрическую цепь с образованием джоулева тепла в месте контакта фланца-инструмента, его гребней и обрабатываемой детали.

В качестве ТЧ использован оксид алюминия (размером до 40 мкм) в смеси с ПАВ — глицерином. В процессе ФЭО модифицирование поверхностного слоя армированием ТЧ можно проводить разными способами. Например, предварительным нанесением на обрабатываемую поверхность модификатора, представляющего собой смесь частиц твердого материала и ПАВ, с последующей обработкой поверхности.

Другой способ состоит в предварительном создании в поверхностном слое углублений, заполняемых твердым материалом, и в последующей обработке поверхности.

Способ, реализованный в данном исследовании (см. рис. 1), заключается в обработке специальным инструментом, в осевой канал которого подается модификатор — смесь ТЧ и ПАВ. Модификатор подавали в зону фрикционно-электрического контакта под давлением в консистентном состоянии.

Обработку проводили на специальной установке, созданной на базе вертикально-фрезерного станка 6Р12Б, патрон 1 которого показан на рис. 2. Скорость обработки составляла

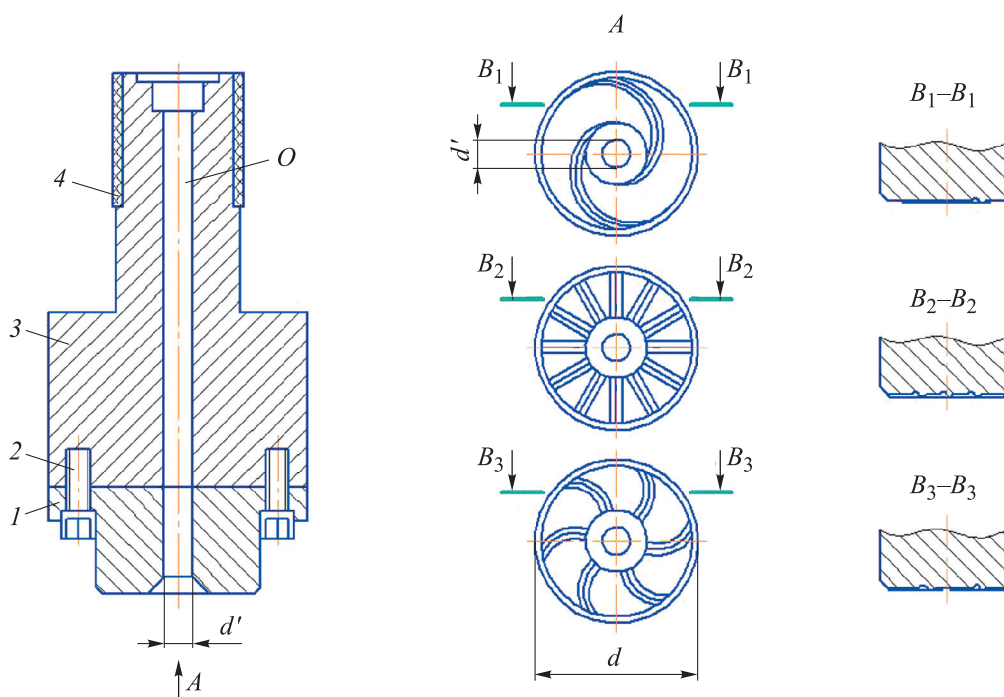


Рис. 1. Схема инструмента для ФЭО

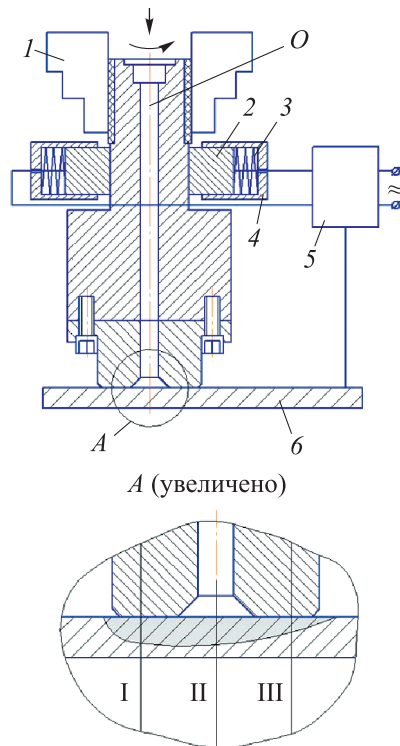


Рис. 2. Схема установки ФЭО

150...200 мм/мин, частота вращения рабочего инструмента в процессе ФЭО — 1000...1200 мин⁻¹, сила подаваемого электрического тока — 300...500 А.

Влияние ФЭО на механические свойства образца оценивали по изменению микротвердости его поверхностного слоя на приборе ПМТ-3 в соответствии с ГОСТ 9450-76. При этом замеры микротвердости осуществляли в поперечном сечении поверхностного слоя детали в плоскостях I, II и III (см. рис. 2).

Для изучения структуры и глубины упрочненного слоя образцов проводили металлографический анализ их шлифов с помощью оптических микроскопов Neophot-21 и МИМ-8. Структурно-фазовый состав поверхностного слоя и его изменение в процессе модификации изучали методом рентгеноструктурного анализа. Рентгенограммы с поверхностей исследуемых образцов получали на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3М в медном фильтрованном излучении (с длиной волны $\lambda = 0,154$ нм) при двух режимах съемки.

Для ФЭО характерно воздействие на поверхностный слой детали высококонцентрированными источниками тепла: трением и электрическим током. Причем последний обладает свойством адаптивного управления, а также

концентрацией в тонком приповерхностном слое, что способствует повышению пластичности обрабатываемого материала [16].

При этом деформационное воздействие и трение обеспечивают поверхностному слою требуемые параметры шероховатости. К значительному увеличению твердости поверхности приводит наличие в зоне обработки модификатора, представляющего собой смесь ПАВ и ТЧ [16]. Все перечисленные факторы позволяют получить поверхностный слой с высокими эксплуатационными свойствами.

Для образцов, поверхности которых модифицированы ФЭО с армированием частицами оксида алюминия и подачей электрического тока в рабочую зону, металлографический анализ показал увеличение глубины (примерно в 4-5 раз) и ширины упрочненного слоя (примерно на 30...40 %) по сравнению с аналогичными параметрами образцов, обработанных ФО без подачи электрического тока в рабочую зону. При этом основным фактором, влияющим на ширину зоны обработки, является диаметр фланца-инструмента.

Для ФЭО характерен асимметричный контур зоны фрикционного (фрикционно-электрического) воздействия (см. рис. 2). Материал обрабатываемого поверхностного слоя вытягивается по направлению движения рабочего инструмента и образует зоны с разной по значению микротвердостью, что связано с направленным перемещением армирующих частиц в процессе ФЭО, зависящим от направления движения и вращения рабочего инструмента.

При этом осуществляется модифицирование поверхностного слоя частицами оксида алюминия, образующими армирующую матрицу с более высокой концентрацией частиц в приповерхностном слое и с постепенным уменьшением концентрации по мере удаления от поверхности. ФО без подачи электрического тока в рабочую зону способствует созданию более тонкого модифицированного слоя с менее равномерным размещением ТЧ и формированием участков их коагуляции.

Исследование микротвердости поверхностного слоя после обработки показало в поперечном сечении образцов твердость по Викерсу, равную 105...120 НВ для ФО без подачи электрического тока в рабочую зону (рис. 3), что примерно на 30...40 % больше, чем у исходных образцов. При этом на глубине примерно в 250...300 мкм твердость постепенно

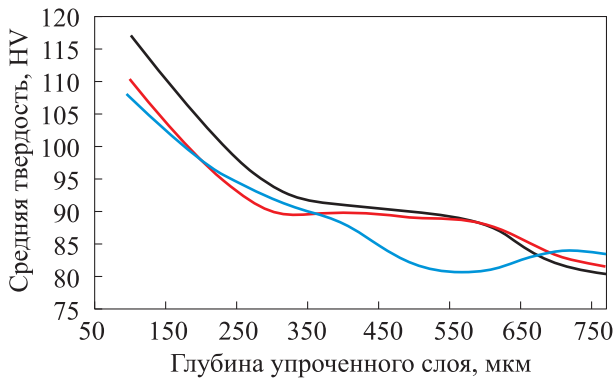


Рис. 3. Распределение средней твердости в плоскостях I (—), II (—) и III (—) поперечного сечения детали из сплава АМг4,5, модифицированного ФО с армированием частицами оксида алюминия

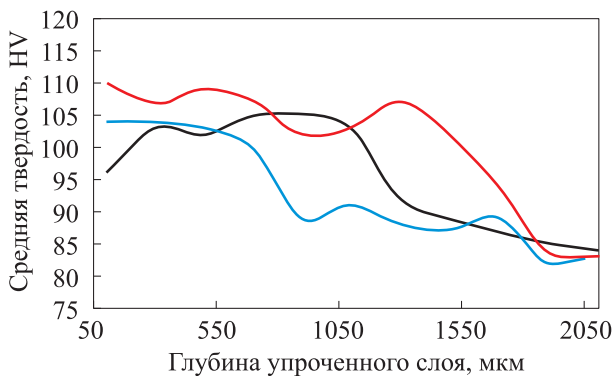


Рис. 4. Распределение средней твердости в плоскостях I (—), II (—) и III (—) поперечного сечения детали из сплава АМг4,5, модифицированного ФО с армированием частицами оксида алюминия, при силе тока $I = 400$ А

снижается до исходных значений необработанных образцов.

После ФЭО твердость в поверхностном слое по поперечному сечению образцов составила 95...115 HV (рис. 4), что несколько меньше, чем у образцов, обработанных ФО без воздействия

электрического тока на рабочую зону. Однако в этом случае толщина упрочненного слоя примерно равна 1200 мкм.

Некоторое снижение твердости поверхностного слоя может быть связано с нагревом обрабатываемой детали вследствие прохождения через рабочую зону электрического тока, с расширением обрабатываемого трека поверхности и с соответствующим сокращением плотности распределения ТЧ в поверхностном слое. При этом значительным положительным эффектом является повышение износостойкости поверхностного слоя.

Выводы

1. Экспериментальные исследования показали эффективность ЭФО. Присутствие в технологической цепочке комбинированной обработки операции подачи электрического тока в рабочую зону позволяет увеличить обрабатываемый объем материала и существенно увеличить глубину фрикционно-электрического термического воздействия (примерно в 4...5 раз). При этом ширина трека обработки напрямую зависит от диаметра фланца-инструмента и возрастает до 30 %.

2. Армирующие частицы оксида алюминия более равномерно распределяются в поверхностном слое, причем их глубина залегания несколько больше, чем при ФО без подачи электрического тока. Верхние значения твердости поверхностного слоя в результате ФЭО снизились примерно на 10 %, однако глубина упрочненного слоя возросла примерно в 3...4 раза. При этом армирование поверхностного слоя частицами оксида алюминия значительно повышает износостойкость алюминиевых деталей.

Литература

- [1] Makarov A.V., Savrai R.A., Pozdejeva N.A., Smirnov S.V., Vichuzhanin D.I., Malygina I., Korshunov L.G. Effect of hardening friction treatment with hard-alloy indenter on microstructure, mechanical properties, and deformation and fracture features of constructional steel under static and cyclic tension. *Surface and Coatings Technology*, 2010, vol. 205, no. 3, pp. 841–852, doi: 10.1016/j.surfcoat.2010.08.025
- [2] Вичужанин Д.И., Макаров А.В., Смирнов С.В., Поздеева Н.А., Малыгина И.Ю. Напряженно-деформированное состояние и поврежденность при фрикционной упрочняющей обработке плоской стальной поверхности скользящим цилиндрическим индентором. *Проблемы машиностроения и надежности машин*, 2011, № 6, с. 61–69.
- [3] Аскинази Б.М. *Упрочнение и восстановление деталей машин электромеханической обработкой*. Москва, Машиностроение, 1989. 200 с.

- [4] Эдигаров В.Р., Малый В.В. Повышение износостойкости деталей ходовой части многоцелевых гусеничных машин комбинированными методами электромеханической обработки. *Вестник СибАДИ*, 2014, № 4(38), с. 57–64.
- [5] Байбарацкая М.Ю., Пальянов А.А., Машков Ю.К. Упрочняющая фрикционно-электрическая обработка стальных поверхностей трения. *Трение и износ*, 2004, т. 25, № 4, с. 434–439.
- [6] Эдигаров В.Р. Исследование температурных полей в рабочей зоне фрикционно-электрического контакта. *Актуальные проблемы в машиностроении*, 2017, № 1, т. 4, с. 57–61.
- [7] Федоров С.К., Федорова Л.В. Упрочнение и восстановление деталей машин электромеханической обработкой. *Трактора и сельскохозяйственные машины*, 1998, № 6, с. 42–43.
- [8] Машков Ю.К., Байбарацкая М.Ю., Пальянов А.А. Повышение износостойкости стальных деталей методом трибоэлектрической обработки. *Омский научный вестник*, 2002, вып. 18, с. 101–103.
- [9] Макаров А.В. *Наноструктурирующая фрикционная обработка углеродистых и низколегированных сталей*. Тольятти, ТГУ, 2011. 434 с.
- [10] Miranda R.M., Santos Telmo G., Gandra J., Lopes N., Silva R.J.C. Reinforcement strategies for producing functionally graded materials by friction stirprocessing in aluminium alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, 2013, September, pp. 1609–1615, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2013.03.022
- [11] Mahmoud E.R.I., Takahashi M., Shibayanagi T., Ikeuchi K. Effect of friction stir processing tool probe on fabrication of SiC particle reinforced composite on aluminium surface. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2009, vol. 14(5), pp. 413–425, doi: 10.1179/136217109X406974
- [12] Miranda R.M., Gandra J., Vilaca P. *Modern Surface Engineering Treatments. Chapter 1. Surface modification by friction based processes*. Intech Publications, Rijeka, Croatia, 2013.
- [13] Suhuddin U.F.H., Mironov S., Sato Y.S., Kokawa H. Grain structure and texture evolution during friction stir welding of thin 6016 aluminum alloy sheets. *Materials Science*, 2010, vol. 527, pp. 1962–1969, doi: 10.1016/j.msea.2009.11.029
- [14] Suhuddin U.F.H., Mironov S., Sato Y.S., Kokawa H., Lee C.-W. Grain structure evolution during friction stir welding of AZ31 magnesium alloy. *Acta Materialia*, 2009, vol. 57, pp. 5406–5418, doi: 10.1016/j.actamat.2009.07.041
- [15] Santos Telmo G., Miranda R.M., Vilaça P. Friction stir welding assisted by electrical Joule effect. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, vol. 214(10), pp. 2127–2133, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2014.03.012
- [16] Машков Ю.К., Эдигаров В.Р., Байбарацкая М.Ю., Овчар З.Н. Комбинированное фрикционно-электрическое модифицирование стальных поверхностей трения. *Трение и износ*, 2006, т. 27, № 1, с. 89–94.

References

- [1] Makarov A.V., Savrai R.A., Pozdejeva N.A., Smirnov S.V., Vichuzhanin D.I., Malygina I., Korshunov L.G. Effect of hardening friction treatment with hard-alloy indenter on microstructure, mechanical properties, and deformation and fracture features of constructional steel under static and cyclic tension. *Surface and Coatings Technology*, 2010, vol. 205, no. 3, pp. 841–852, doi: 10.1016/j.surfcoat.2010.08.025
- [2] Vychuzhanin D.I., Makarov A.V., Smirnov S.V., Pozdeeva N.A., Malygina I.Y. Stress and strain and damage during frictional strengthening treatment of flat steel surface with a sliding cylindrical indenter. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2011, vol. 40, no. 6, pp. 554–560, doi: 10.3103/S1052618811050190
- [3] Askinazi B.M. *Uprochneniye i vosstanovleniye detaley mashin elektromekhanicheskoy obrabotkoy* [Hardening and restoration of machine parts by electromechanical processing]. Moscow, Mashinostroyeniye publ., 1989. 200 p.
- [4] Edigarov V.R., Maly V.V. Improving wear resistance of details of multi-purpose tracked machines' running gear by combined methods of electromechanical processing. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 2014, no. 4(38), pp. 57–64 (in Russ.).

- [5] Bajbaratskaya M.Yu., Palyanov A.A., Mashkov Yu.K. A method of friction electric hardening treatment of steel friction surfaces. *Journal of Friction and Wear*, 2004, vol. 25, no. 4, pp. 434–439.
- [6] Edigarov V.R. Probe of temperature fields in the working zone of the frictionelectric contact. *Actual Problems in Machine Building*, 2017, no. 1, vol. 4, pp. 57–61 (in Russ.).
- [7] Fedorov S.K., Fedorova L.V. Hardening and restoration of machine parts by electromechanical processing. *Traktora i sel'skokhozyaystvennyye mashiny*, 1998, no. 6, pp. 42–43 (in Russ.).
- [8] Mashkov Yu.K., Baybaratskaya M.Yu., Pal'yanov A.A. Improving the wear resistance of steel parts by triboelectric processing. *Omskiy nauchnyy vestnik*, 2002, iss. 18, pp. 101–103 (in Russ.).
- [9] Makarov A.V. *Nanostrukturiruyushchaya friktsionnaya obrabotka uglerodistykh i nizkolegirovannykh staley* [Nanostructural friction treatment of carbon and low alloy steels]. Tolyatti, TSU publ., 2011. 434 p.
- [10] Miranda R.M., Santos Telmo G., Gandra J., Lopes N., Silva R.J.C. Reinforcement strategies for producing functionally graded materials by friction stirprocessing in aluminium alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, 2013, September, pp. 1609–1615, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2013.03.022
- [11] Mahmoud E.R.I., Takahashi M., Shibayanagi T., Ikeuchi K. Effect of friction stir processing tool probe on fabrication of SiC particle reinforced composite on aluminium surface. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2009, vol. 14(5), pp. 413–425, doi: 10.1179/136217109X406974
- [12] Miranda R.M., Gandra J., Vilaca P. *Modern Surface Engineering Treatments. Chapter 1. Surface modification by friction based processes*. Intech Publications, Rijeka, Croatia, 2013.
- [13] Suhuddin U.F.H., Mironov S., Sato Y.S., Kokawa H. Grain structure and texture evolution during friction stir welding of thin 6016 aluminum alloy sheets. *Materials Science*, 2010, vol. 527, pp. 1962–1969, doi: 10.1016/j.msea.2009.11.029
- [14] Suhuddin U.F.H., Mironov S., Sato Y.S., Kokawa H., Lee C.-W. Grain structure evolution during friction stir welding of AZ31 magnesium alloy. *Acta Materialia*, 2009, vol. 57, pp. 5406–5418, doi: 10.1016/j.actamat.2009.07.041
- [15] Santos Telmo G., Miranda R.M., Vilaça P. Friction stir welding assisted by electrical Joule effect. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, vol. 214(10), pp. 2127–2133, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2014.03.012
- [16] Mashkov Yu.K., Edigarov V.R., Baybaratskaya M.Yu., Ovchar Z.N. Combined friction-electric modification of steel friction surfaces. *Treniye i iznos*, 2006, vol. 27, no. 1, pp. 89–94 (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 15.04.2020

Информация об авторе

ЭДИГАРОВ Вячеслав Робертович — кандидат технических наук, доцент, начальник кафедры двигателей. Омский автобронетанковый инженерный институт (644098, Омск, Российская Федерация, 14-й Военный городок, e-mail: edigarovs@mail.ru).

Information about the author

EDIGAROV Vyacheslav Robertovich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Head of Engine Department. Omsk Armored Vehicle Engineering Institute (644098, Omsk, Russian Federation, 14th Military Town, e-mail: edigarovs@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Эдигаров В.Р. Поверхностная фрикционно-электрическая обработка алюминиевых сплавов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2020, № 10, с. 47–53, doi: 10.18698/0536-1044-2020-10-47-53

Please cite this article in English as:

Edigarov V.R. Surface Friction-Electric Treatment of Aluminum Alloys. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2020, no. 10, pp. 47–53, doi: 10.18698/0536-1044-2020-10-47-53