

Е. В. БЕРЕЖНАЯ, Э. П. ГРИБКОВ, В. Д. КУЗНЕЦОВ

ЧИСЛЕННОЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОНСОЛИДАЦИИ ПОРОШКОВОЙ СРЕДЫ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНЫМ МЕТОДОМ

Розроблено математичну модель напружено-деформованого стану та температурного поля порошкового матеріалу в термодформаційній зоні при електроконтактному наплавленні деталей типу тіл обертання, що враховує утворення металевих зв'язків між порошковим середовищем та поверхнею деталі та дозволяє визначити раціональні технологічні режими процесу нанесення функціонального шару. Досліджено розподіл температур в шарі, що наплавляється в термодформаційній зоні, що дозволяє визначити характер розподілу силових навантажень.

Ключові слова: математична модель, порошкова середа, термодформація.

Разработана математическая модель напряженно-деформированного состояния и температурного поля порошкового материала в термодформационной зоне при электроконтактной наплавке деталей типа тел вращения, учитывающая образование металлических связей между порошковой средой и поверхностью детали и позволяющая определить рациональные технологические режимы процесса нанесения функционального слоя. Исследовано распределение температур в слое, наплавляемом в термодформационной зоне, позволяющей определить характер распределения силовых нагрузок.

Ключевые слова: математическая модель, порошковая среда, термодформація.

A mathematical model of the stress-strained state and temperature fields of powder material in the thermal deformation zone at the electric contact surfacing of the shaft type parts is developed. The mathematical model accounts for the metal connection arising between the powder material and the surface of the part and also allows determining efficient operating parameters of the coating formation process. Studying the distribution of the temperatures in the layer surfaced in the thermal deformation zone allows determining the character of power load distribution.

Key words: mathematical model, powder medium, thermal deformation.

Введение. Увеличение прочности, надежности и долговечности деталей механизмов и узлов трения, подвергающихся при эксплуатации повышенному воздействию тепловых и механических нагрузок, является актуальной проблемой современного машиностроения [1].

Анализ последних исследований. При восстановлении изношенных деталей наиболее распространенным технологическим процессом является электроконтактная наплавка композиционными материалами, позволяющая создавать на поверхности изделия необходимый рабочий слой [2]. Сложность проведения процесса наплавки связана с некоторыми ограничениями, обусловленными неравномерным и неконтролируемым распределением электрического тока в различных точках контакта поверхности изделия с порошковой средой, что может приводить к несплавлениям или перегревам и выплескам в отдельных участках [3 – 5]. Технологические режимы процесса электроконтактной наплавки, плотность и величина электрического тока оказывают влияние на протекание процесса спекания порошковых материалов, что делает актуальной разработку соответствующей математической модели [6].

Постановка задачи. Исследование влияния технологических режимов процесса электроконтактной наплавки и фракции порошкового материала на распределение температурных полей в термодформационном очаге.

Математическая модель. Наличие получаемых в результате спекания достаточно прочных металлических связей между порошковой средой и поверхностью детали несколько видоизменяет как схему, так и методику расчета напряженно-деформированного состояния [7]. В частности, исходя из условия сохранения целостности наплавляемой композиции и считая поверхность детали пластически недеформируемой, можно сделать вывод об отсутствии продольных ε_l и поперечных ε_b деформаций порошковой среды [8], то есть:

$$\varepsilon_l = \varepsilon_b = 0. \quad (1)$$

Используем методику расчета данной технологической схемы [7] и осуществим разбиение очага деформации на конечное множество элементарных объемов (рис. 1); тогда текущие значения нормальных σ_{xi} и нормальных контактных p_{xi} напряжений можно определить как:

$$p_{xi} = \sigma_{sxi} / 3 \sqrt{[(1 + 4\alpha_{xi}) / \alpha_{xi}] \cdot \beta_{xi}}; \quad (2)$$

$$\sigma_{xi} = (1 - 2\alpha_{xi}) / (1 + 4\alpha_{xi}) p_{xi}, \quad (3)$$

где α_{xi} , β_{xi} – текущие значения коэффициентов условия пластичности наплавляемой порошковой среды; i – порядковый номер поперечного сечения термодформационного очага; σ_{sxi} – текущее значение предела текучести твердой фазы данной порошковой композиции, принимаемое величиной, переменной по длине термодформационного очага и определяемой функционально в зависимости от текущего значения эквивалентной пластической деформации $\varepsilon_{эxi}$.

Текущее значение эквивалентной пластической деформации в этом случае может быть определено равенством:

$$\varepsilon_{\text{эки}} = 1/3 \sum_{i=1}^k \beta_{xi}^{1/2} (4 + 1/\alpha_{xi})^{1/2} \Delta\gamma_{xi} / \gamma_{xi}^2, \tag{4}$$

где k – порядковый номер анализируемого сечения; $\Delta\gamma_{xi}$ – приращение относительной плотности, получаемое при переходе от $(i - 1)$ к i -му элементарному сечению.

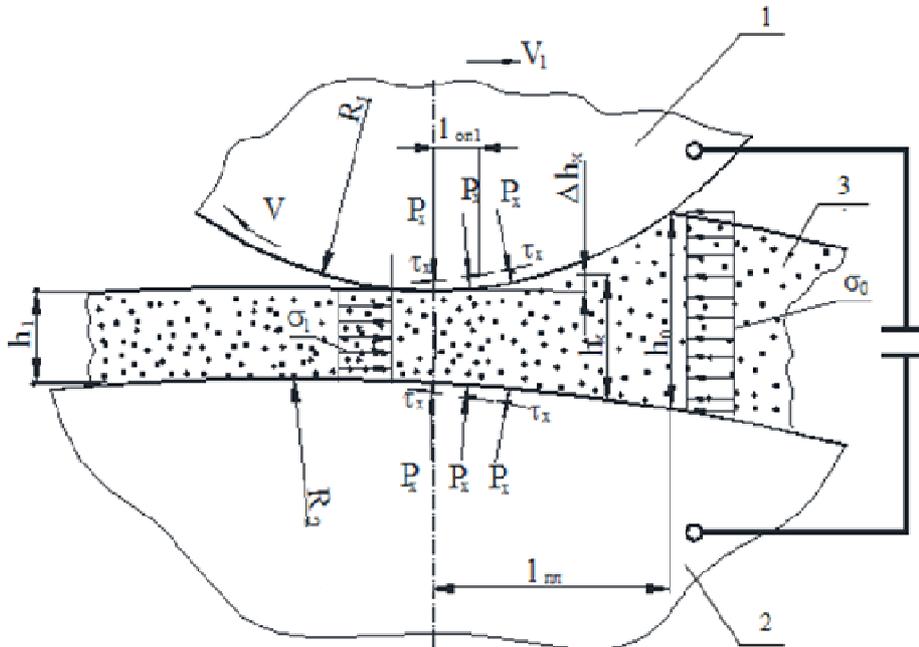


Рис. 1 – Расчетная схема при электроконтактной наплавке порошковых материалов:
 1 – ролик-электрод машины для электроконтактной наплавки; 2 – деталь; 3 – слой порошкового материала.

Текущее значение относительной плотности γ_{xi} , знание которого необходимо для определения согласно (4) эквивалентной пластической деформации, может быть определено непосредственно из условия сохранения массы:

$$\gamma_{xi} = h_0 \gamma_0 / h_{xi}, \tag{5}$$

где h_0 – исходная толщина порошковой среды в сечении на входе в термдеформационный очаг (рис. 1); γ_0 – исходная относительная плотность порошковой среды в сечении на входе в термдеформационный очаг; h_{xi} – текущее значение толщины наплавляемой композиции.

Решив уравнение статического равновесия выделенного элементарного объема термдеформационного очага по отношению к сдвиговым напряжениям τ_{x1} , имеющим место в плоскости сопряжения порошковой композиции с поверхностью детали, получим:

$$\tau_{x1} = [\sigma_{x1} h_{x1} - \sigma_{x2} h_{x2} + (p_{x1} + p_{x2})(h_{x1} - h_{x2})/2] \Delta x - (p_{x1} f_{x1} - p_{x2} f_{x2})/2, \tag{6}$$

где положительные значения τ_{x1} соответствуют направлению перемещению наплавляемой детали;

$$f_{x1(2)} = f_{om1(2)} \left[\frac{l_{nl} - x}{l_{nl}} \right]^{a_{f1(2)}}$$

– касательные контактные напряжения в очаге деформации, которые подчиняются закону трения Кулона – Аммонтона; $f_{om1(2)}$ – опорные значения коэффициентов трения, соответствующие значениям данных коэффициентов в сечении на входе ($x = l_{nl}$) и на выходе ($x = 0$) из зоны уплотнения; $a_{f1(2)}$ – степенные показатели, характеризующие форму эпюры распределения коэффициентов трения по длине контактных поверхностей на ролике-электроде и наплавляемой детали соответственно; 1, 2 – индексы, соответствующие условиям трения на ролике-электроде (1) и наплавляемой поверхности (2); Δx – шаг разбиения термдеформационного очага.

Имеющая достаточно большое количество степеней свободы степенная форма аналитического описания была использована и при расчете текущего значения толщины наплавляемой композиции:

$$h_x = h_1 + (h_0 - h_1) (x/l_{nl})^{a_h}, \tag{7}$$

где h_1 – конечная толщина получаемого слоя (рис. 1); a_h – степенной показатель формы очага деформации, количественная оценка которого может быть принята равной $a_h = 2,0$ [5, 9].

Текущие значения коэффициентов α_x и β_x , согласно рекомендациям работы [9] могут быть определены равенствами:

$$\alpha_x = a(1 - \gamma_x)^m; \beta_x = \gamma_x^{2n}, \quad (8)$$

где $\gamma_x = \rho_x / \rho_0$ – изменяющееся по длине очага деформации значение относительной плотности порошковой композиции; ρ_x, ρ_0 – текущая плотность и плотность твердой фазы данной порошковой композиции; a, m, n – постоянные для каждого конкретного состава значения коэффициентов, характеризующих интенсивность изменения α_x и β_x в зависимости от изменения показателя относительной плотности γ_x [9].

Для определения температурного поля в порошковом материале при электроконтактной наплавке на основе определения теплоемкости и закона Джоуля – Ленца, пренебрегая теплоотводом по рекомендациям работ [6], определяли объемную температуру:

$$t = \frac{U^2 x_i^2 h_{xi} b \gamma_{xi} \rho_0}{R V_{xi}} + t_0, \quad (9)$$

где U – напряжение электрического тока; R – сопротивление электрической цепи; b – ширина порошкового слоя; V_{xi} – текущее значение скорости электроконтактной наплавки; t_0 – температура порошковой среды перед наплавкой.

Сила, действующая на частицу порошка, будет определяться её формой и уровнем нормальных контактных напряжений. Для частиц сферической формы:

$$N_k = p_{xi} \frac{\pi d^2}{2}, \quad (10)$$

где d – диаметр частицы порошкового материала.

Для определения радиуса контакта между частицами, возникающего при пластической деформации использовали следующие известные зависимости [6]:

$$\alpha_k = \sqrt{\frac{N_k \exp(-4 f_{x1(2)} \xi \Delta x / h_{x2})}{\pi \sigma_{sx} m_k k_k (\cos(\varphi) + f_{x1(2)} (\pi / 2 - \varphi))}}, \quad (11)$$

где ξ – коэффициент бокового давления:

$$\xi = \frac{\mu}{1 - \mu} \gamma_x;$$

μ – коэффициент Пуассона; m_k, k_k – число столбцов и пар контактов, проводящих электрический ток:

$$m_k = h_{x2} / d; k_k = m_k \Delta x / d;$$

φ – угол между нормалью к площади контакта и направлением приложения нагрузки.

Площадь контакта между частицами определяется равенством:

$$a_k = \pi \alpha_k k^2, \quad (12)$$

где k – коэффициент теплопроводности.

Обобщенная контактная проводимость была определена на основе решений уравнения Лапласа [6] формулой:

$$\sigma_\varepsilon = \frac{\sigma_0 k_k}{\frac{2,13}{f_{x1(2)} \pi \xi \sqrt{HB} k_k / N_k} \frac{1}{\exp(2 f_{x1(2)} \xi \Delta x / h_{x2})} \frac{2,4 \Delta x}{\pi^2 h_{x2}^2}}, \quad (13)$$

где σ_0 – удельная электропроводность; HB – твердость частиц порошкового слоя по Бринеллю.

Для дальнейшего определения температурного поля необходимо знание параметров электрической цепи. В частности, силы тока:

$$I = U \sigma_\varepsilon, \quad (14)$$

и плотности тока:

$$j = \frac{I}{h_{x2} b}. \quad (15)$$

Разность температур между геометрическим центром частицы и межчастичным контактом [6] составляет:

$$dT = \frac{0,2\rho_k d^4 j^2}{k a^2}, \tag{16}$$

где ρ_k – удельное электрическое сопротивление.

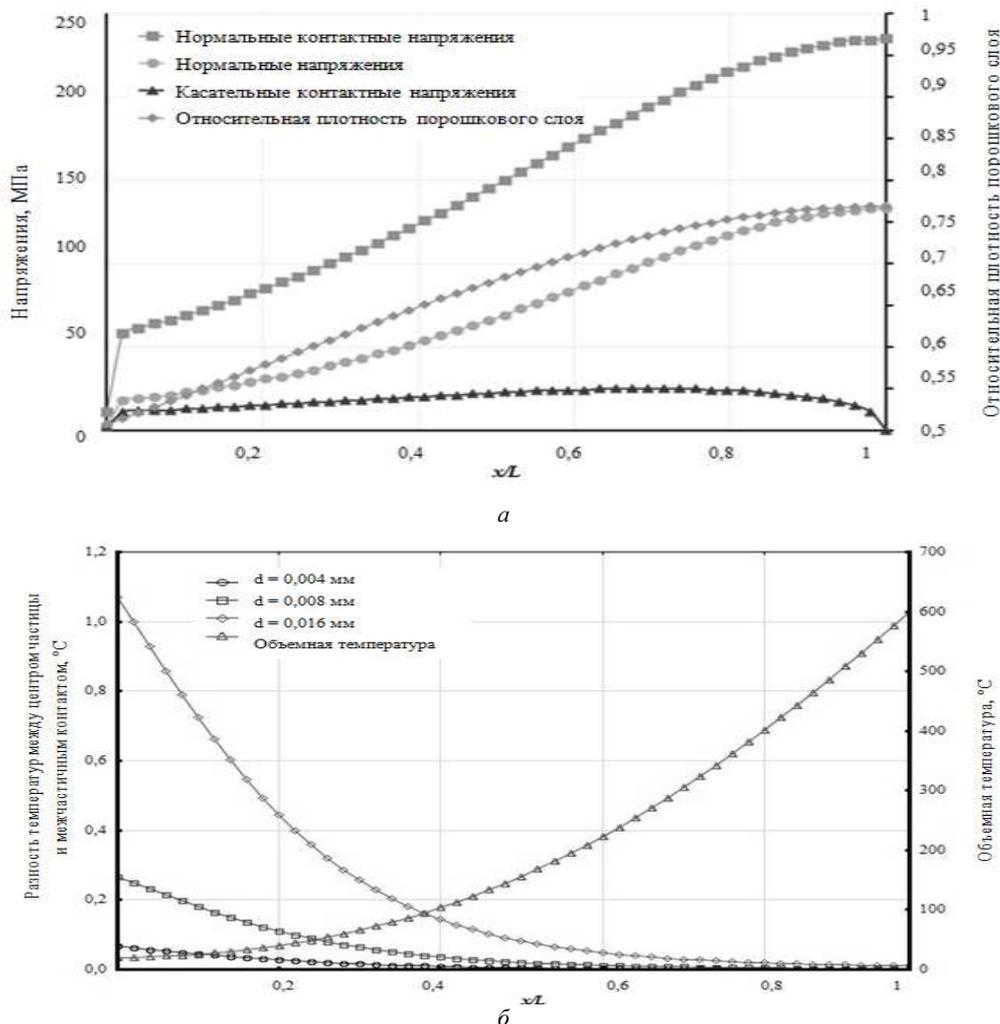


Рис. 2 – Расчетные распределения локальных характеристик процесса по длине термдеформационного очага при электро-контактной наплавке порошкового слоя: а – силовых; б – тепловых.

В качестве векторной направленности используемой рекуррентной схемы решения принимали направление, соответствующее движению электроконтактной наплавки, а в качестве условий связи при переходе от i – го к $(i + 1)$ элементарному объему использовали следующие условия:

$$x_{l(i+1)} = x_{2i}; h_{x1(i+1)} = h_{x2i}; f_{x11(i+1)} = f_{x12i}; f_{x21(i+1)} = f_{x22i}; \gamma_{x1(i+1)} = \gamma_{x2i}; p_{x1(i+1)} = p_{x2i}; \sigma_{x1(i+1)} = \sigma_{x2i}, \tag{17}$$

где начальные условия, то есть геометрические и силовые характеристики для первого элементарного объема, соответствовали равенствам:

$$x_{l|i=1} = l_{nl}; h_{x1|i=1} = h_0; f_{x11|i=1} = f_{om}; f_{x21|i=1} = f_{om}; \gamma_{x1|i=1} = \rho_{ym} / \rho_0; \sigma_{x1|i=1} = 0;$$

$$p_{x1|i=1} = 1.155 \sigma_{sx1|i=1} \sqrt{\frac{1 + \alpha_{x1|i=1}}{1 + 4\alpha_{x1|i=1}}} \beta_{x1|i=1}, \tag{18}$$

ρ_{ym} – плотность утряски порошковой среды.

По мере вычисления всех компонент напряженно-деформированного состояния и геометрии термдеформационного очага были определены основные интегральные характеристики процесса электроконтактной наплавки, в том числе усилие на ролике-электроде P_{np} , среднеинтегральное значение нормальных контактных напряжений P_{cp} и момент на ролике-электроде M_1 [9]:

$$P_{np} = b \sum_{i=2}^{Kr} \frac{P_{x2(i-1)} + P_{x2i}}{2} \Delta x ; \quad (19)$$

$$P_{cp} = \frac{P_{np}}{bL_0} ; \quad (20)$$

$$M_1 = \sum_{i=2}^{Kr} \tau_{xli} \Delta x R_1 b . \quad (21)$$

Представленные выше зависимости (1) – (21) легли в основу математической модели напряженно-деформированного состояния и температурного поля при электроконтактной наплавке порошковых материалов, на основе которых были разработаны соответствующие программные средства.

Пример моделирования. В качестве примера реализации разработанных программных средств на рис. 2 представлены расчетные распределения локальных характеристик по длине термомодеформационного очага при электроконтактной наплавке никелевого порошка.

Согласно полученным расчетным данным в процессе электроконтактной наплавки происходит возрастание средней температуры порошкового слоя на выходе из термомодеформационного очага при одновременном снижении разности температур между центром частицы и межчастичным контактом. Так, при электроконтактной наплавке порошковой композиции с размером частиц 8 мкм наблюдается снижение разности температур в центре термомодеформационного очага почти в 5 раз, что существенно сказывается на протекании процессов спекания порошкового слоя. Кроме того, с увеличением фракции порошкового материала растет разность температур (частицы диаметром 16 мкм имеют начальную разность температур в 4 раза выше, чем порошковый материал с размером частиц 8 мкм). Это свидетельствует о неоднородности температурного поля в термомодеформационном очаге, зависящей от изменения теплофизических свойств частиц порошкового материала в процессе нагрева.

Результаты работы использованы при проектировании технологии и оборудования для восстановления деталей, работающих в условиях износа на ряде предприятий машиностроительного комплекса Украины с экономическим эффектом 738 тыс. грн.

Выводы. Разработана математическая модель напряженно-деформированного и теплового состояния порошкового слоя при электроконтактной наплавке, позволяющая прогнозировать характер распределения силовых характеристик процесса по длине термомодеформационного очага, а также определять механизм процесса наплавки по известным физико-механическим характеристикам порошкового слоя и заданным технологическим параметрам. На основе предложенной математической модели разработаны программные средства, которые использованы при автоматизированном проектировании энергосиловых и тепловых характеристик процесса консолидации материалов, а также при разработке технологических рекомендаций при получении рабочего слоя, причём как при напекании порошковых композиций, в том числе и рабочего подслоя, так и при синтезе новых материалов при электроконтактной наплавке порошковыми электродами.

Список литературы

1. Фролов К. В. Современная трибология : Итоги и перспективы. – М. : Издательство ЛКИ, 2008. – 480 с.
2. Бурков П. В. Спекание порошков TiC-NiTi пропусканием электрического тока // Тяжёлое машиностроение. – 2008. – № 12. – С. 21 – 23.
3. Чигарев В. В., Пресняков В. А., Кассова Е. В. Разработка технологии подготовки поверхности восстанавливаемого изделия под электроконтактное плакирование порошковым электродом // Захист металургійних машин від поломок : Зб. наук. праць. – Маріуполь : ПДТУ. – 2008. – №10. – С. 238 – 242.
4. Berezshnaya O., Chepel Ju., Tsyvinda N., Pikilnyak A. Mathematic modeling of detail's restoration combined process // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – № 10. – P. 198 – 201.
5. Бережняя Е. В., Грибков Э. П. Электроконтактное упрочнение слоя, нанесенного газотермическим напылением // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні. – 2014. – №. 1. – С. 173 – 180.
6. Андрущук Л. О., Шпак А. П., Ошкадеров С. П. Физические основы получения мелкокристаллических и наноструктурных материалов спеканием металлических порошков электроконтактным нагревом // Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии: Зб. наук. пр. – К. : РВВ ІМФ, 2008. – Т. 6, № 1. – С. 153 – 215.
7. Chigarev V. V., Belik A. G., Gribkov E. P., Gavrish P. A. A mathematical model of the process of rolling flux-cored tapes // Welding International. – 2015. – Vol. 29. – Issue 1. – pp.70 – 74. DOI:10.1080/09507116.2014.888192.
8. Андрущук Л. О., Ошкадеров С. П., Шпак А. П., Курнас В. И. Физические основы получения высокопрочных порошковых материалов с помощью скоростной электротермической обработки // НАН Украины. Физ.-техн. ин-т металлов и сплавов. – К. : ФТИМС НАН Украины, 2007. – 84 с.
9. Gribkov E. P., Perig A. V., Danilyuk V. A. Research into the process of producing powder tapes // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2015. – Vol. 77. – pp. 1087 – 1104. DOI: 10.1007/s00170-014-6496-x.

References (transliterated)

1. Frolov K. V. *Sovremennaya tribologiya : Itogi i perspektivy* [Contemporary tribology: results and perspectives]. Moscow, Izdatel'stvo LKI Publ., 2008. 480 p.
2. Burkov P. V. *Spekanie poroshkov TiC-NiTi propuskaniem elektricheskogo toka* [Sintering TiC-NiTi powders by conducting electric current]. *Tyazheloe mashinostroenie*. 2008, no. 12, pp. 21–23.
3. Chigarev V. V., Presnyakov V. A., Kassova E. V. *Razrabotka tekhnologii podgotovki poverkhnosti vosstanavlivaemogo izdeliya pod elektrokontaktnoe plakirovanie poroshkovym elektrodom* [Developing technology of preparing recoverable item surface for electric contact facing with

- powder electrode]. *Zakhyst metalurgiynykh mashyn vid polomok: Zb. nauk. prats'* [Error protection of metallurgical equipment: collected works]. Mariupol', PDTU Publ., 2008, no. 10, pp. 238–242.
- Berezshnaya O., Chepel' Ju., Tsyvinda N., Pikilnyak A. Mathematic modeling of detail's restoration combined process. *Metallurgical and Mining Industry*. 2015, no. 10, pp. 198–201.
 - Berezshnaya E. V., Gribkov E. P. Elektrokontaktnoe uprochnenie sloya, nanesenogo gazotermicheskim napyleniem [Electric contact strengthening of a gas thermal sprayed layer]. *Resursozberigayuchi tekhnologii' vyrobnytstva ta obrobky tyskom materialiv u mashynobuduvanni* [Resource-saving production and material forming technologies in mechanical engineering]. 2014, no. 1, pp. 173–180.
 - Andrushchik L. O., Shpak A. P., Oshkaderov S. P. Fizicheskie osnovy polucheniya melkokristallicheskih i nanostrukturnykh materialov spekaniem metallicheskih poroshkov elektrokotaktnym nagrevom [Physical basis for producing fine crystalline and nanostructural materials by sintering metallic powders by electric contact heating]. *Nanosystemy, nanomaterialy, nanotekhnologii' : Zb. nauk. pr.* [Nanosystems, Nanomaterials, Nanotechnologies: Collected Works]. Kyiv, RVV IMF Publ., 2008, Vol. 6, no. 1, pp. 153–215.
 - Chigarev V. V., Belik A. G., Gribkov E. P., Gavrish P. A. A mathematical model of the process of rolling flux-cored tapes. *Welding International*. 2015, Vol. 29, issue 1, pp. 70–74. DOI:10.1080/09507116.2014.888192.
 - Andrushchik L. O., Oshkaderov S. P., Shpak A. P., Kurpas V. I. *Fizicheskie osnovy polucheniya vysokoprochnykh poroshkovykh materialov s pomoshch'yu skorostnoy elektrotermicheskoy obrabotki* [Physical basis for producing high-strength powder materials by high-speed electric thermal processing]. *NAN Ukrainy. Fiz.-tekh. in-t metallov i splavov* [National Academy of Science of Ukraine. Physico-Technological Institute of Metals and Alloys]. Kyiv, FTIMS NAN Ukrainy Publ., 2007. 84 p.
 - Gribkov E. P., Perig A. V., Danilyuk V. A. Research into the process of producing powder tapes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015, Vol. 77, pp. 1087–1104. DOI: 10.1007/s00170-014-6496-x.

Поступила (received) 27.02.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Чисельне математичне моделювання процесу консолідації порошкової середі електроконтактним методом / О. В. Бережна, Е. П. Грибков, В. Д. Кузнецов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 6 (1228). – С. 15 – 20. Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2222-0631.

Численное математическое моделирование процесса консолидации порошковой среды электроконтактным методом / Е. В. Бережная, Э. П. Грибков, В. Д. Кузнецов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 6 (1228). – С. 15 – 20. Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2222-0631.

Numerical mathematical modeling of power medium consolidation by electric contact method / O. V. Berezshnaya, E. P. Gribkov, V. D. Kuznetsov // Bulletin of National Technical University «KhPI» Series: Mathematical modeling in engineering and technologies. – Kharkiv : NTU «KhPI», 2017. – № 6 (1228). – pp. 15 – 20. Bibliog.: 9 titles. – ISSN 2222-0631.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / Information about authors

Бережна Олена Валеріївна – кандидат технічних наук, докторант кафедри «Інженерія поверхні», Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ; тел.: (044) 204-99-14; e-mail: elena.kassova@mail.ua.

Бережная Елена Валерьевна – кандидат технических наук, докторант кафедры «Инженерия поверхности», Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев; тел.: (044) 204-99-14; e-mail: elena.kassova@mail.ua.

Berezshnaya Olena Valeriivna – Candidate of Technical Sciences, Doctoral, Department of Surface Engineering, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv; tel.: (044) 204-99-14; e-mail: elena.kassova@mail.ua.

Грибков Едуард Петрович – доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри «Автоматизовані металургійні машини і обладнання», Донбаська державна машинобудівна академія, м. Донбас; тел.: (0626) 41-46-81; e-mail: amm@dgma.donetsk.ua.

Грибков Эдуард Петрович – доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные металлургические машины и оборудование», Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Донбасс; тел.: (0626) 41-46-81; e-mail: amm@dgma.donetsk.ua.

Gribkov Eduard Petrovich – Candidate of Technical Sciences, Docent, Automated Metal Forming Process and Machinery Department, Donbass State Engineering Academy, Donbass; tel.: (0626) 41-46-81; e-mail: amm@dgma.donetsk.ua.

Кузнецов Валерій Дмитрович – професор, доктор технічних наук, професор кафедри «Інженерія поверхні», Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ; тел.: (044) 204-99-14; e-mail: v.kuznetsov@kpi.ua.

Кузнецов Валерий Дмитриевич – профессор, доктор технических наук, профессор кафедры «Инженерия поверхности», Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев; тел.: (044) 204-99-14; e-mail: v.kuznetsov@kpi.ua.

Kuznetsov Valeriy Dmitrievich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Surface Engineering, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv; tel.: (044) 204-99-14; e-mail: v.kuznetsov@kpi.ua.