

УДК 621.762.4.047

**Э. П. ГРИБКОВ****МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛОЩЕНИЯ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКИ В МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКЕ**

Плющенные порошковые ленты отличаются технологичностью изготовления и используются для восстановительной наплавки. Одним из требований стандартов на порошковые ленты является обеспечение равномерного распределения плотности порошкового сердечника по сечению ленты. В работе разработана конечно-элементная модель плющения порошковой проволоки, основанная на анализе напряженно-деформированного состояния порошкового сердечника и металлической оболочки. Получены распределения деформаций, напряжений и плотности порошка по всему объему очага деформации. Из анализа представленных результатов показано, что наиболее равномерная деформация порошкового сердечника наблюдается при больших обжатиях, при  $h_1/d_0 < 0,75$ . При малых обжатиях недеформированными остаются боковые кромки заготовки, что снижает их эксплуатационные свойства. Адекватность модели проверена на основе сравнения результатов расчета с аналитической моделью, при этом погрешность расчета силы прокатки не превысила 10%. Экспериментальные исследования процесса плющения порошковой проволоки подтвердили достоверность разработанной математической модели, при этом погрешность по определению силы прокатки составила 1,0...16,3% со среднеквадратичным отклонением 5,39%, что говорит о достаточной точности расчета и правомочности принятых допущений. Предложенная модель может быть использована для анализа распределения напряжений и деформаций в объеме очага деформации при плющении порошковой проволоки. Рекомендуемые степени деформации могут быть использованы в качестве критериев при автоматизированном проектировании технологических режимов волочения и плющения порошковой проволоки.

**Ключевые слова:** плющение, порошковая лента, порошковая проволока, прокатка, конечно-элементная модель, напряженно-деформированное состояние

**Е. П. ГРИБКОВ****МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПЛОЩЕННЯ ПОРОШКОВОГО ДРОТУ В МЕТАЛЕВІЙ ОБОЛОНЦІ**

Плющені порошкові стрічки відрізняються технологічністю виготовлення і використовуються для відновлювального наплавлення. Однією з вимог стандартів на порошкові стрічки є забезпечення рівномірного розподілу щільності порошкового сердечника по перерізу стрічки. В роботі розроблена скінченно-елементна модель плющення порошкового дроту, заснована на аналізі напружено-деформованого стану порошкового сердечника і металевій оболонки. Отримано розподіли деформацій, напружень і щільності порошку по всьому об'єму осередку деформації. З аналізу представлених результатів показано, що найбільш рівномірна деформація порошкового сердечника спостерігається при великих обжатках, при  $h_1/d_0 < 0,75$ . При малих ступенях деформації недеформованими залишаються бічні кромки заготовки, що знижує експлуатаційні властивості стрічок. Адекватність моделі перевірено на основі порівняння результатів розрахунку з аналітичною моделлю, при цьому похибка розрахунку сили прокатки не перевищила 10%. Експериментальні дослідження процесу плющення порошкового дроту підтвердили достовірність розробленої математичної моделі, при цьому похибка по визначенню сили прокатки склала 1,0 ... 16,3% з середньоквадратичним відхиленням 5,39%, що говорить про достатню точність розрахунку і правомірності прийнятих припущень. Запропонована модель може бути використана для аналізу розподілу напружень і деформацій в об'ємі осередку деформації при плющенні порошкового дроту. Рекомендовані ступені деформації можуть бути використані в якості критеріальних при автоматизованому проектуванні технологічних режимів волочіння і плющення порошкового дроту.

**Ключові слова:** плющення, порошкова стрічка, порошковий дріт, прокатка, кінцеве-елементна модель, напружено-деформований стан

**E. P. GRIBKOV****MATHEMATICAL MODELING FLATTENING CORED WIRE IN A METAL SHEATH**

Flattening powder tapes characterized by manufacturability and used for reducing surfacing. In the developed finite-element model, flattening cored wire based on the analysis of stress-strain state of the powder core and metal shell. One of the requirements of standards for powder tape is to ensure uniform distribution of the powder core density over the cross section of the tape. Distribution of strains, stresses and powder density throughout the volume of the deformation zone were obtained. From the analysis of these results shows that the most uniform deformation of the powder core is observed at high reduction of the order  $h_1/d_0 < 0.75$ . At low reductions, the lateral edges of the blank remain undeformed, which reduces their performance properties of the tapes. Adequacy of the model is checked by comparing the calculated results with the analytical model, the calculation error of the rolling force is not exceeded 10%. Experimental studies of flux-cored strip rolling confirmed the accuracy of the developed mathematical model, while the error in determining the rolling force was 1.0 ... 16.3% with a standard deviation of 5.39%, which indicates sufficient accuracy of calculation and validity of the assumptions made. The proposed model can be used to analyze the distribution of stresses and strains in the volume of deformation zone at flattening cored wire. Recommended degree of deformation can be used as a criterion at the automated designing technological modes drawing and flattening of the cored wire.

**Keywords:** flattening, powder strip, powder wire, rolling, finite-element model, stress-strain state

**Введение.** Сравнительный анализ технико-экономических характеристик альтернативных вариантов регенерации конструктивных размеров изнашивающихся рабочих поверхностей показывает, что в современных условиях дефицита материальных и энергетических ресурсов восстановительная наплавка является высокоэффективным ресурсосберегающим

технологическим приемом. Удовлетворение регламентаций эксплуатационной надежности наплавленного металла, способности противостоять различным видам изнашивания, соблюдение принципов взаимозаменяемости и экономической целесообразности во многом определяется качеством электродного материала. С точки зрения показателей

качества методы прогнозирования геометрических параметров плавящегося электродного материала в виде порошковой плющенной ленты, представлены на основе производственного опыта. Полученные ранее данные по изготовлению плющенной ленты не учитывает наличие порошкового сердечника. Отсутствие математического аппарата по определению результирующих геометрических и физико-механических характеристик порошковой плющенной ленты делает актуальной задачу разработки математической модели напряженно-деформированного состояния при реализации данного процесса.

**Анализ публикаций.** Порошковые ленты нашли широкое применение в сварочном производстве. Их конструкция представляет металлическую оболочку, которая заполнена порошковым сердечником [1]. Порошок выполняет роль флюса при сварке [2]. Материал оболочки и состав порошка выбирается в зависимости от свариваемых деталей и может быть разнообразным [3-4]. Одним из способов изготовления порошковой ленты является плющение порошковой проволоки в рабочих валках прокатной клети.

Процесс плющения проволоки из сплошных материалов изучен достаточно полно. Определено влияние скорости прокатки, радиуса валков на энергосиловые параметры [5]. Определены геометрические характеристики очага деформации, спрогнозирована ширина получаемых лент и уровень силовых параметров. При этом были использованы как численные [6], так и конечно-элементные модели [7].

Конечно-элементные модели также широко используются при моделировании процессов прокатки порошковых материалов [8, 9]. Данные модели позволяют определить уровни напряжений, деформаций и плотности порошка по всему объему деформируемого тела. При плющении порошковой проволоки наблюдается преимущественное течение материала по ширине заготовки, хотя его деформация носит трехмерный характер и поэтому конечно-элементное моделирование для описания именно этого процесса является наиболее целесообразным.

Несмотря на наличие целого ряда работ, посвященных процессу прокатки порошковых материалов не решена задача об определении напряженно-деформированного состояния при плющении порошковой проволоки. Не учтено влияние упругой деформации металлической оболочки на энергосиловые параметры процесса. Существующие математические модели плющения проволоки описывают поведение только сплошных сред. Всё это делает актуальной разработку математической модели процесса плющения порошковой проволоки.

**Цель и постановка задачи.** Целью работы является исследование влияния исходных параметров заготовки на распределение напряжений, деформаций и плотности порошка при плющении порошковой проволоки на основе создания конечно-элементной модели процесса.

**Математическая модель процесса плющения порошковой проволоки.** Конечно-элементное

моделирование процессов плющения порошковой проволоки было выполнено в системе Abaqus. При моделировании использовалась расчетная схема (рис. 1а), которая представляла собой деформируемую заготовку и два рабочих валка с гладкой бочкой. Заготовка представляла металлическую оболочку со свойствами сплошной среды, заполненную порошковым сердечником из пористого материала (рис. 1б).

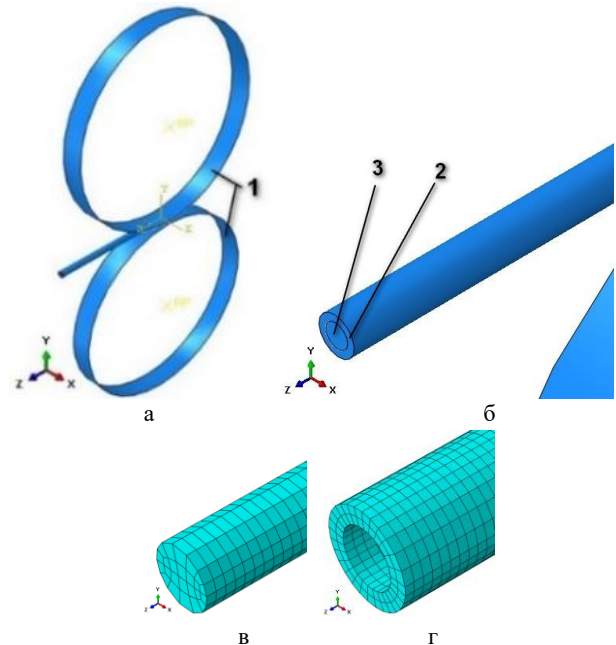


Рис. 1 – Конечно-элементная модель процесса плющения порошковой проволоки (1 – рабочие валки; 2 – металлическая оболочка; 3 – порошковый сердечник): а – расчетная схема; б – заготовка; в – конечно-элементная сетка порошкового сердечника; г – конечно-элементная сетка металлической оболочки

Для заготовки производили дискретизацию объема (построение конечно-элементной сетки) на элементарные области (конечные элементы). Для моделирования валков были использованы трехмерные недеформируемые элементы. Для моделирования и порошкового сердечника (рис. 1,в) и металлической оболочки (рис. 1,г) были использованы восьмиузловые линейные, твердотельные редуцированные элементы с контролем разрушения C3D8R [10].

При моделировании были использованы следующие граничные условия: валки имели одну вращательную степень свободы и угловую скорость вращения равную 1 рад/с. Контакт между заготовкой и валками задавался при помощи модели контакта «Поверхность к поверхности» с коэффициентом трения равным 0,2.

Моделирование было выполнено для следующих исходных параметров:

- диаметр валков – 100 мм;
- внешний диаметр оболочки – 3,2 мм;
- толщина оболочки – 0,6 мм;
- материал оболочки – сталь 08 кп;

– материал порошкового сердечника – железный порошок марки ПЖ4М2;

– межвалковый зазор – 3,13; 2,83; 2,66; 2,5 мм.

Для оценки полученных результатов выходными параметрами были выбраны проекции реакций в контрольных точках валков, а также деформации и напряжения в узлах конечных элементов плющеной заготовки, а также распределения пористости порошкового сердечника (рис. 2).

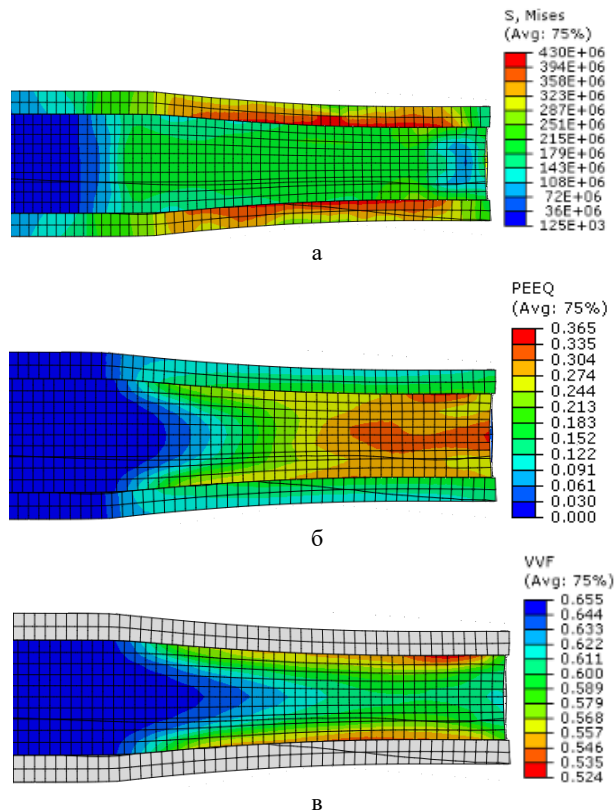


Рис. 2 – Распределение при плющении порошковой проволоки: а - эквивалентных напряжений, б – деформаций, в - пористости

На рис. 3 представлены поля распределений эквивалентных деформаций по сечению плющеной ленты. Из анализа представленных результатов видно, что наиболее равномерная деформация порошкового сердечника наблюдается при больших обжатиях (при  $h_1/d_0 < 0,75$ ). При малых обжатиях недеформированными остаются боковые кромки заготовки, что снижает их эксплуатационные свойства: при малой плотности сердечника будет его высыпание при наплавке, при большей – потеря свойств как флюса. Дополнительные исследования, в том числе и экспериментальные, показали, что при слишком больших деформациях, в частности при  $h_1/d_0 < 0,5$ , наблюдается расслоение оболочки и сердечника, а также нарушение целостности замкового соединения.

**Экспериментальные исследования.** Исследования интегральных энергосиловых параметров и результирующих геометрических характеристик процесса плющения ленты были проведены в лаборатории кафедры «Автоматизированные металлургические машины» ДГМА на базе рабочей клетки 100×100 Г (рис. 4).

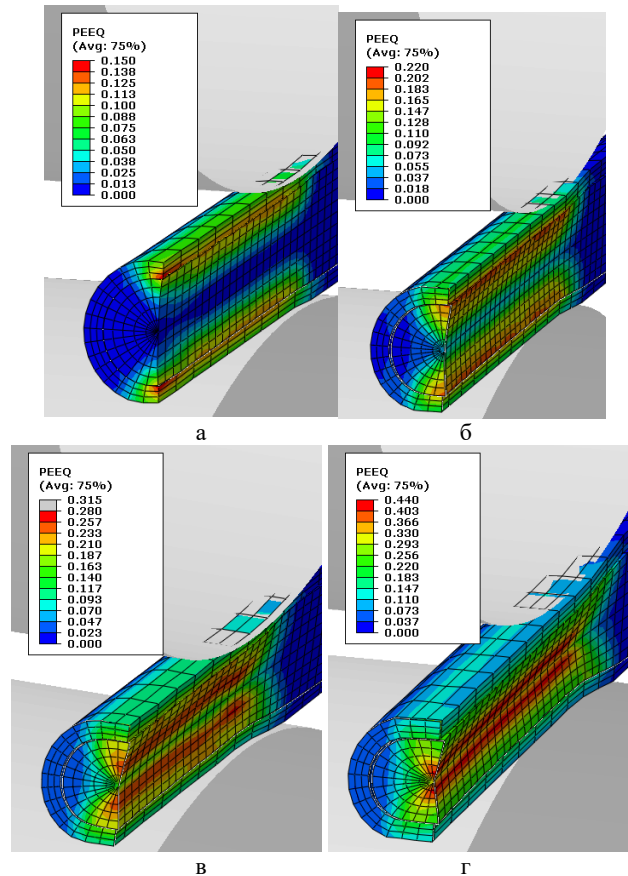


Рис. 3 – Распределение эквивалентных деформаций при плющении порошковой ленты толщиной h: а – h=3,13 мм; б – h=2,83 мм; в – h=2,66 мм; г – h=2,5 мм

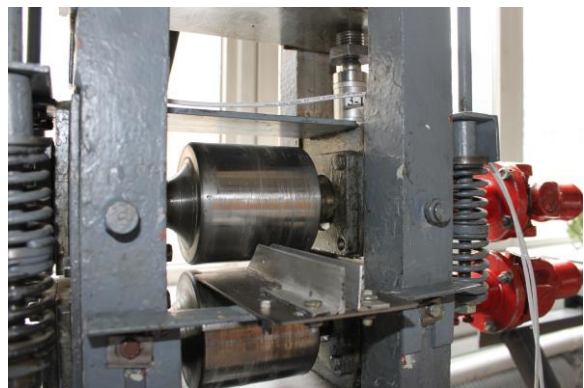


Рис. 4 – Общие виды стана и проводки рабочей клетки 100×100 Г

Непосредственно плочению подвергали предварительно сформованную порошковую проволоку из стали 08 кп с порошковым сердечником, основой которого являлся железный порошок. Собственно, процесс плочения осуществляли с обжатиями от 20% до 50% в рабочей клетки без использования технологической смазки.

В рамках проведения экспериментальных исследований измеряли толщину ленты после прокатки в клетки при помощи микрометра. Силу прокатки фиксировали при помощи месдоз и тензометрической аппаратуры.

Была использована проволока диаметром 3,6 мм с толщиной оболочки – от 0,5 мм. Обжатие  $h_1/d_0$  варьировали от 0,62 до 0,95.

Погрешность модели по определению силы прокатки составила 1,0...16,3% со среднеквадратичным отклонением 5,39%, что подтверждает её адекватность.

В табл. 1 и на рис. 5 представлено сравнение результатов расчета с экспериментами и аналитической моделью [11, 12].

Таблица 1 – Сопоставление экспериментальных результатов с расчетными по аналитической и конечно-элементной моделям

№ опыта	Диаметр проволоки, мм	Толщина ленты, мм	Ширина ленты, мм	Сила прокатки, Н		
				Эксперимент	Аналитическая модель	Конечно-элементная модель
1	3,2	3,13	3,33	736	560	514
2	3,2	2,83	3,72	1165	1545	1700
3	3,2	2,66	3,8	1429	1965	2096
4	3,2	2,5	4,1	1935	2341	2600

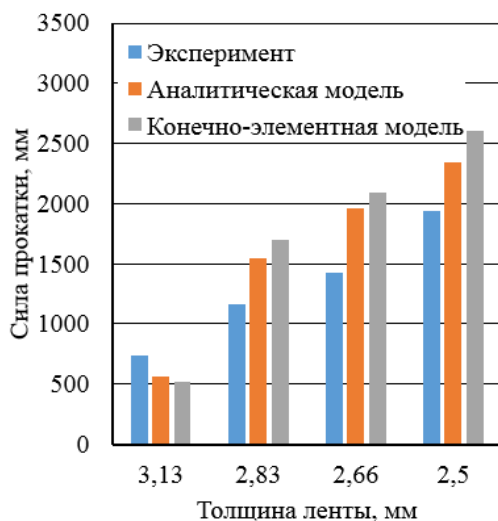


Рис. 5 – Сравнение результатов расчета силы прокатки, полученные по аналитической и конечно-элементной моделям с экспериментальными данными

Из анализа полученных значений силы прокатки видно, что погрешность расчета по сравнению с аналитической моделью не превысила 10%, что говорит о достаточной точности расчета и правомерности принятых допущений. Экспериментальные исследования процесса плочения порошковой проволоки подтвердили достоверность разработанной математической модели, при этом погрешность по определению силы прокатки составила 1,0...16,3% со среднеквадратичным отклонением 5,39%, что удовлетворяет требованиям к практическим расчетам.

**Выводы.** Теоретические исследования процесса плочения порошковой проволоки на основе разработанной конечно-элементной модели показали неравномерность распределения напряжений, деформаций и плотности порошка в объеме очага деформации. Из анализа представленных результатов показано, что наиболее равномерная деформация порошкового сердечника наблюдается при больших обжатиях, при  $h_1/d_0 < 0,75$ . При малых обжатиях недеформированными остаются боковые кромки заготовки, что снижает их эксплуатационные свойства. Адекватность модели проверена на основе сравнения результатов расчета с аналитической моделью, при этом погрешность расчета силы прокатки не превысила 10%. Экспериментальные исследования процесса плочения порошковой проволоки подтвердили достоверность разработанной математической модели, при этом погрешность по определению силы прокатки составила 1,0...16,3% со среднеквадратичным отклонением 5,39%, что говорит о достаточной точности расчета и правомерности принятых допущений. Предложенная модель может быть использована для анализа распределения напряжений и деформаций в объеме очага деформации.

#### Список литературы

1. Наплавка быстрознашивающихся деталей самозащитными порошковыми лентами / Б.В. Данильченко [и др.] // Автоматическая сварка. – 1989. – № 5. – С. 38–41.
2. Ramakrishnan M. Application of submerged arc welding technology with cold wire addition for drum shell long seam butt welds of pressure vessel components / M. Ramakrishnan, V. Muthupandi // Int J Adv Manuf Technol. – 2013. – No. 65 (5-8): pp. 945-956. doi: 10.1007/s00170-012-4230-0
3. Новое оборудование для наплавки конусов и чаш засыпных аппаратов / А. П. Жудра, А. П. Ворончук, А. А. Фомакин, С. И. Великий // Автоматическая сварка. – 2009. – № 9. – С. 57-59.
4. Жудра А. П. Износостойкая наплавка порошковыми лентами / А. П. Жудра, А. П. Ворончук // Сварщик. – 2010. – № 6. – С. 6–10.
5. Kazeminezhad M. An experimental investigation on the deformation behavior during wire flat rolling process / M. Kazeminezhad, Taheri A. Karimi // J. Mater. Process Tech. – 2005. – No. 160(3): pp. 313-320. doi:10.1016/j.jmatprotec.2004.06.020
6. Lambiase F. Experimental and Finite Element Investigation of Roll Drawing Process / F. Lambiase, Ilio A. Di // J. Mater. Eng. Perform. – 2012. – No 21(2). – pp. 161-166. doi:10.1007/s11665-011-9932-1.
7. Valletlano C. Analysis of deformations and stresses in flat rolling of wire / C. Valletlano, P. A. Cabanillas, F. J. García-Lomas // J Mater Process Tech. – 2008. – No. 195(1-3): pp. 63-71. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2007.04.124
8. Mori K. Analysis of the forming process of sintered powder metals by rigid-plastic finite-element method / K. Mori, K. Osakada // Int. J.

- Mech. Sci. – 1987. – No. 29(4): pp. 229-238. doi: 10.1016/0020-7403(87)90037-3
9. Zheng Z.-X. Experimental and numerical modeling for powder rolling / Z.-X. Zheng, W. Xia, Z. Y. Zhou // Rev. Adv. Mater. Sci. – 2013. – No. 33: pp. 330-336. [http://www.ipme.ru/e-journals/RAMS/no\\_43313/05\\_433\\_zheng.pdf](http://www.ipme.ru/e-journals/RAMS/no_43313/05_433_zheng.pdf)
  10. Манилык, Т. Практическое применение программного комплекса ABAQUS в инженерных задачах. Версия 6.5 / Т. Манилык, К. Ильин. – М.: МФТИ, ТЕСИС, 2006. – 99 с.
  11. Грибков Э. П. Математическое моделирование процесса плавления порошковой проволоки / Э.П. Грибков // Обработка материалов давлением: сборник научных трудов. – Краматорск: ДГМА, 2015. – № 2 (41). – С. 96–102.
  12. Gribkov Eduard P. Research into the process of producing powder tapes / Eduard P. Gribkov, Alexander V. Perig // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2016. – Vol. 85. – Issue 9. – pp. 2887–2900. doi: 10.1007/s00170-016-8714-1

#### References (transliterated)

1. Naplavka bystroiznashivajushihsjia detalej samozashhitnymi poroshkovymi lentami [Surfacing of wear parts with self-protecting powder tapes] / B. V. Danil'chenko [i dr.]. // Avtomaticheskaja svarka [Automatic welding]. – 1989. – issue 5. – pp. 38–41.
2. Ramakrishnan M. Application of submerged arc welding technology with cold wire addition for drum shell long seam butt welds of pressure vessel components / M. Ramakrishnan, V. Muthupandi // Int J Adv Manuf Technol. – 2013. – No. 65 (5-8): pp. 945-956. doi: 10.1007/s00170-012-4230-0
3. Новое оборудование для наплавки конусов и чаш засыпных аппаратов [New equipment for surfacing cones and bowls of filling apparatus] / A. P. Zhudra, A. P. Voronchuk, A. A. Fomakin, S. I. Velikij // Avtomaticheskaja svarka [Automatic welding]. – 2009. – issue 9. – pp. 57-59.
4. Zhudra A. P. Iznosostojkaja naplavka poroshkovymi lentami [Wear-resistant surfacing with powder tapes] / A. P. Zhudra, A. P. Voronchuk // Svarshhik [Welder]. – 2010. – issue 6. – S. 6–10.
5. Kazeminezhad M. An experimental investigation on the deformation behavior during wire flat rolling process / M. Kazeminezhad, Taheri A. Karimi // J. Mater. Process Tech. – 2005. – No. 160(3): pp. 313-320. doi:10.1016/j.jmatprotec.2004.06.020
6. Lambiase F. Experimental and Finite Element Investigation of Roll Drawing Process / F. Lambiase, Ilio A. Di // J. Mater. Eng. Perform. – 2012. – No 21(2). – pp. 161-166. doi:10.1007/s11665-011-9932-1.
7. Vallengano C. Analysis of deformations and stresses in flat rolling of wire / C. Vallengano, P. A. Cabanillas, F. J. García-Lomas // J Mater Process Tech. – 2008. – No. 195(1-3): pp. 63-71. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2007.04.124
8. Mori K. Analysis of the forming process of sintered powder metals by rigid-plastic finite-element method / K. Mori, K. Osakada // Int. J. Mech. Sci. – 1987. – No. 29(4): pp. 229-238. doi: 10.1016/0020-7403(87)90037-3
9. Zheng Z.-X. Experimental and numerical modeling for powder rolling / Z.-X. Zheng, W. Xia, Z. Y. Zhou // Rev. Adv. Mater. Sci. – 2013. – No. 33: pp. 330-336. [http://www.ipme.ru/e-journals/RAMS/no\\_43313/05\\_433\\_zheng.pdf](http://www.ipme.ru/e-journals/RAMS/no_43313/05_433_zheng.pdf)
10. Manilyk T. Prakticheskoe primenenie programmnoho kompleksa ABAQUS v inzhenernyh zadachah. Versija 6.5 [Practical application of the software complex ABAQUS in engineering problems. Version 6.5] / T. Manilyk, K. Il'in. – М.: МФТИ, ТЕСИС, 2006. – 99 p.
11. Gribkov E. P. Matematicheskoe modelirovanie processa pljushhenija poroshkovej provoloki [Mathematical modeling of the process of flattening cored wire] / E.P. Gribkov // Obrabotka materialov davleniem: sbornik nauchnyh trudov [Pressure treatment: Sat. sci.tr. – Kramatorsk: DGMA, 2015. – № 2 (41). – pp. 96–102.
12. Gribkov Eduard P. Research into the process of producing powder tapes / Eduard P. Gribkov, Alexander V. Perig // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2016. – Vol. 85. – Issue 9. – pp. 2887–2900. doi: 10.1007/s00170-016-8714-1

Поступила (received) 10.11.2018

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

**Грибков Едуард Петрович (Грибков Эдуард Петрович, Gribkov Eduard Petrovich)** – доктор технічних наук, доцент, Донбаська державна машинобудівна академія, завідувач кафедри автоматизованих металургійних машин і обладнання; м. Краматорськ, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1565-6294>; e-mail: [gribkov.eduard@gmail.com](mailto:gribkov.eduard@gmail.com)