

УДК 621.791.95

Грибков Э. П.

**АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ПРОКАТКИ КОМПОЗИЦИЙ, ВКЛЮЧАЮЩИХ ПОРОШКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

Одним из эффективных методов повышения сроков службы деталей металлургического оборудования, эксплуатируемых в жестких условиях термических теплосмен, высоких статических и динамических силовых воздействий, является восстановительная наплавка изношенных поверхностей порошковыми лентами. Технология изготовления порошковых электродов оказывает существенное влияние на сварочно-технологические свойства, на химический состав металла шва и его механические показатели. Качественные показатели процесса наплавки во многом определяются характеристиками порошковой ленты, которые формируются на стадии ее изготовления. Однако одна из устойчивых тенденций производства порошковых лент заключается в том, что их отсортировка как у изготовителя, так и потребителя является следствием несоответствия их сварочно-технологических свойств предъявляемым требованиям [1]. С точки зрения показателей качества при реализации процесса совместного обжата сердечника и оболочки методы прогнозирования степени стабильности их коэффициентов заполнения, геометрических параметров, определяющих эффективность последующих наплавочных операций, представлены на эмпирическом уровне, на обобщении производственного опыта. Актуальным в данном случае является решение задач по автоматизированному проектированию технологических режимов прокатки порошковых лент. Существующие модели напряженно-деформированного состояния порошковых материалов при прокатке, основанные на использовании таких ресурсоемких методов как метод конечных элементов [2–3] затрудняют выполнение задач по нахождению оптимальных режимов и выбору параметров исходной заготовки, что делает целесообразным использование инженерных методик расчета [4–6].

Целью данной работы является разработка математического аппарата, позволяющего выполнять автоматизированное проектирование технологических режимов прокатки порошковой ленты, а именно определять исходные параметры прокатки при заданных результирующих характеристиках процесса.

Для выбора рациональных технологических режимов прокатки композиционных материалов необходимо знание влияния исходных технологических режимов на основные показатели процесса, которое можно получить при помощи математического эксперимента.

Основными технологическими параметрами для процесса прокатки композиции порошок – порошок являются опорные значения коэффициентов трения, исходная толщина композиции, соотношение исходных толщин её обеих составляющих, исходная плотность составляющих и конечная толщина композиции. Основными параметрами процесса в этом случае будут результирующие плотности составляющих композиции, соотношение их конечных толщин, характер распределения локальных характеристик (нормальных, нормальных контактных и касательных контактных напряжений) по длине очага деформации, значение силы и момента прокатки.

Исходя из вышесказанного в данной работе путем реализации математических моделей, разработанных в работах [6–8], были получены расчетные распределения локальных и интегральных характеристик процесса прокатки композиции порошок – порошок в зависимости от различных исходных параметров (рис. 1–3).

Интегральные характеристики процесса, а именно, расчетные распределения нормальных контактных напряжений, конечной относительной плотности проката и отношения конечных толщин слоев в зависимости от величины обжата представлены на рис. 1, б. Локальные же характеристики, то есть распределения текущих толщин и относительной плотности каждой композиции, представлены на рис. 1, а. Из анализа представленных расчетных

распределений видно, что с увеличением обжатия наблюдается интенсивный рост момента и силы прокатки, а также конечной относительной плотности, которая при обжатиях около 75 % практически становится равной единице. При увеличении обжатия наблюдается уменьшение соотношений толщин слоев, причем более интенсивное обжатие наблюдается со стороны наиболее мягкой составляющей.

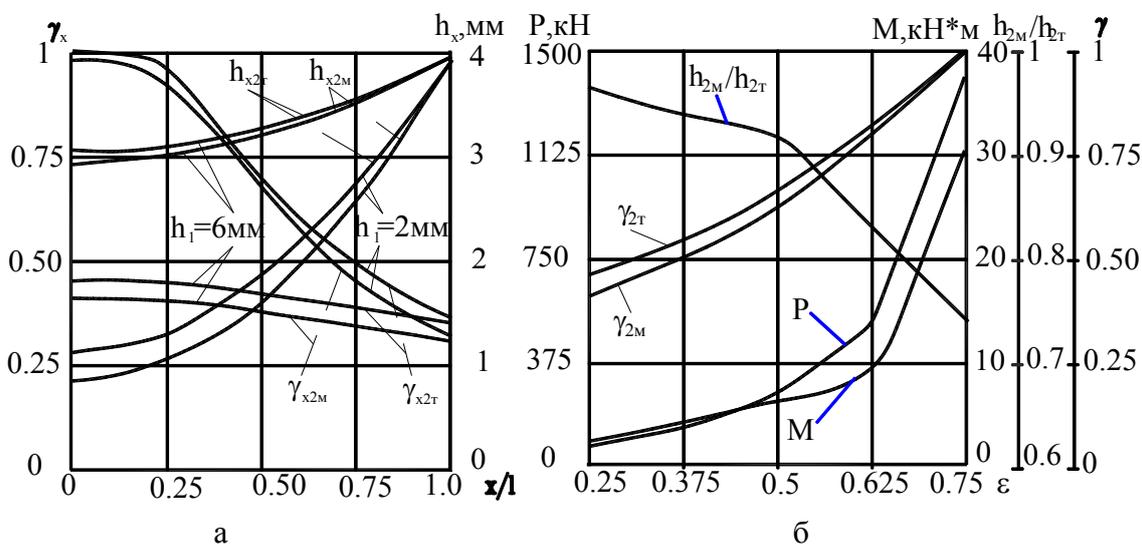


Рис.1. Расчетные распределения характеристик процесса прокатки двухслойной порошковой ленты в зависимости от величины обжатия:

а – локальных; б – интегральных

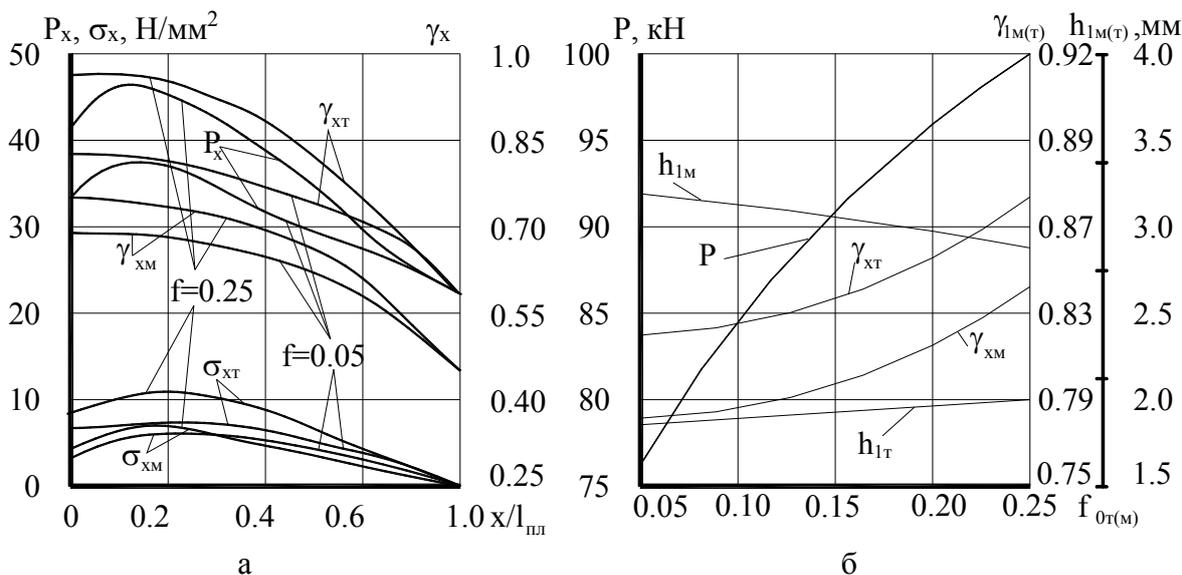


Рис. 2. Расчетные распределения характеристик процесса прокатки двухслойной порошковой ленты в зависимости от значения коэффициентов внешнего трения:

а – локальных; б – интегральных

На рис. 2 представлены расчетные распределения локальных (см. рис. 2, а) и интегральных (см. рис. 2, б) характеристик процесса в зависимости от значения коэффициента внешнего трения. При его увеличении наблюдается более интенсивная деформация со стороны твердой составляющей, а также рост нормальных, нормальных контактных напряжений, силы и суммарного момента прокатки.

На рис. 3 представлены распределения локальных (см. рис. 3, а) и интегральных (см. рис. 3, б) характеристик процесса в зависимости от соотношения толщин твердой и мягкой составляющих композиции. Из анализа представленных распределений видно,

что при уменьшении соотношения толщин мягкой составляющей к твердой наблюдается перераспределение локальных характеристик по длине очага деформации (см. рис. 3, а), что в частности приводит к снижению максимума нормальных контактных напряжений и плотности как твердой, так и мягкой составляющих. Помимо этого при увеличении отношения толщины мягкой составляющей к толщине твердой до 0,4 наблюдается резкий рост силы прокатки (см. рис. 3, б). При увеличении данного соотношения конечная толщина твердой составляющей уменьшается, причем практически линейно. Увеличение соотношения также приводит к монотонно возрастающему увеличению плотности составляющих.

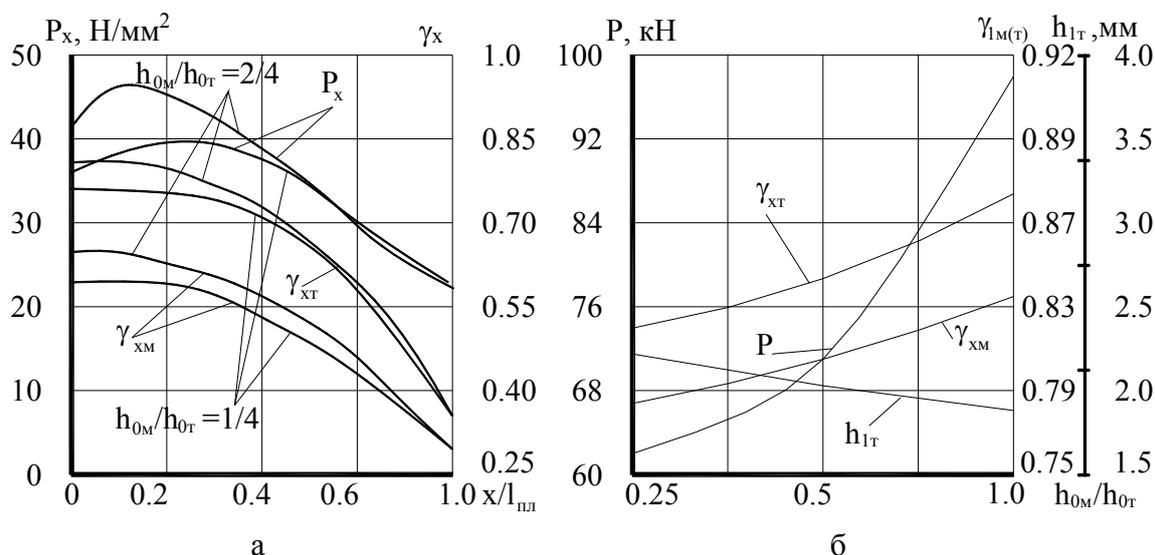


Рис. 3. Расчетные распределения характеристик процесса прокатки композиции порошок (м) – порошок (т) в зависимости от величины соотношения толщин её составляющих: а – локальных; б – интегральных

Представленные зависимости основных параметров позволяют выбрать оптимальные исходные технологические режимы процесса прокатки композиции порошок – порошок.

Для выбора рациональных технологических режимов прокатки помимо всего прочего требуется решение задач оптимизационного характера. Применительно к прокатке композиций на основе порошковых материалов конечной целью процесса будет являться получение проката с заданной плотностью порошковых составляющих и обеспечение требуемых толщин, как всей композиции, так и её компонентов.

В соответствии вышеизложенным, для определения необходимых показателей качества готовой металлопродукции было выполнено автоматизированное проектирование технологических параметров прокатки композиций на основе порошковых материалов. В качестве критериев проектирования при этом были выбраны необходимые значения  $[h_{1T}]$ ,  $[h_{1M}]$ ,  $[\gamma_{1M}]$ . В качестве параметров проектирования –  $h_0$ ,  $h_{0M}/h_{0T}$ . В качестве целевых функций – рассмотренные ранее детерминированные численные математические модели и регрессионные описания. Собственно решение включало внутренний цикл на основе итерационной процедуры по определению  $h_{0M}$  и  $h_{0T}$ , обеспечивающих требуемые результирующие значения  $h_{1T}/h_{1M}$ :

$$(h_{0M}/h_{0T})_{(k+1)} = (h_{0M}/h_{0T})_k + A_{h_{0M}/h_{0T}} \operatorname{sign}\{[h_{0M}/h_{0T}] - h_{0M}/h_{0T}\}_k,$$

$$\text{где } \operatorname{sign}\{[h_{0M}/h_{0T}] - h_{0M}/h_{0T}\}_k = \begin{cases} +1 & \text{при } ([h_{0M}/h_{0T}] - h_{0M}/h_{0T}) > 0; \\ 0 & \text{при } ([h_{0M}/h_{0T}] - h_{0M}/h_{0T}) \approx 0; \\ -1 & \text{при } ([h_{0M}/h_{0T}] - h_{0M}/h_{0T}) < 0, \end{cases} \quad (1)$$

а также внешний цикл, основанный на итерационном определении  $h_0$ , обеспечивающий требуемое значение  $\gamma_{1M}$ :

$$h_{0(t+1)} = h_{0t} + A_{h_0} \text{sign} \{ [\gamma_{1M}] - \gamma_{1M} \}_t. \quad (2)$$

При определении оптимальных исходных параметров был использован метод целенаправленного перебора. В качестве примера на рис. 4 представлены расчетные зависимости, позволяющие определять необходимые значения исходных толщин композиции при заданных относительной плотности порошка и соотношения результирующих толщин составляющих композиции.

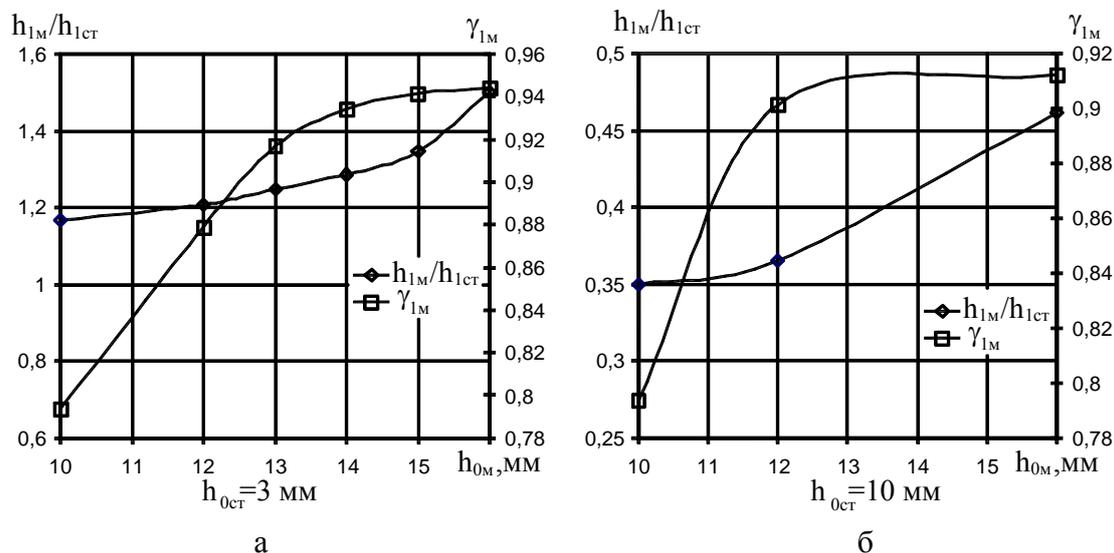


Рис. 4. Расчетные зависимости соотношения конечных толщин составляющих композиции и конечной относительной плотности порошковой составляющей от исходной толщины порошкового слоя для толщины монометалла:

а – 3 мм; б – 10 мм

Как правило, традиционная прокатка порошковых материалов осуществляется в два этапа: первичная (уплотняющая) прокатка неспеченного материала и вторичная (калибрующая) – после спекания порошков. Такая технологическая схема позволяет снизить энергосиловые параметры процесса при одновременном обеспечении требуемой плотности порошка, что ведет за собой при проектировании оборудования снижение его металлоемкости и повышение качества продукции.

При этом следует отметить, что на качество продукции существенно будут влиять силы прокатки в первом и втором проходах, так как при их неравенстве возникают различные упругие деформации валковых узлов, что приводит к неравномерности распределения давления в проходах и появлению нежелательных краевых эффектов у боковых кромок листа. С другой стороны, обеспечение этого равенства сил в первом и во втором проходах требует решения задач оптимизационного плана.

Данная задача была решена при условии, что межвалковый зазор при втором проходе фиксирован, и перераспределение сил прокатки может быть достигнуто изменением величины межвалкового зазора в первом проходе. Таким образом путем оптимизации находится значение величины межвалкового зазора после первого прохода, при котором выполняется условие  $P_1 = P_2$ . Помимо обеспечения равенства сил прокатки проблема также заключается в обеспечении заданной плотности порошковой составляющей. Решение этой задачи может быть осуществлено путем поиска необходимого значения исходной толщины порошкового слоя.

В соответствии с вышеизложенным автоматизированное проектирование может быть сведено к решению двухпараметрической задачи, в которой в качестве параметров оптимизации служит исходная толщина одной из составляющих композиции и её толщина после первичной прокатки. В качестве критериев оптимизации – конечная толщина и плотность этой составляющей.

Схема решения в данном случае состоит из двух циклов:

– внутренний цикл по определению толщины композиции после первого прохода:

$$h_{1I(t+1)} = h_{1It} + A_h \text{sign}\{P_I - P_{II}\};$$

– внешний цикл по определению исходной толщины одной из составляющих композиций:

$$h_{0M(m)(k+1)} = h_{0M(m)k} + A_{h0} \text{sign}\{\gamma_{1M(m)} - [\gamma_{1M(m)}]\},$$

где  $t, k$  – номер итерационной процедуры;

$h_{1I}$  – толщина композиции после первого прохода;

$A_h, A_{h0}$  – шаги приращения.

В качестве целевой функции при автоматизированном проектировании были использованы разработанные ранее математические модели первичной и вторичной прокатки.

В качестве примера её численной реализации на рис. 5 представлены расчетные распределения исходных технологических параметров прокатки в зависимости от требуемых результирующих значений толщины композиции  $h_{II}$  и плотности порошкового слоя  $[\gamma_{1M}]$ .

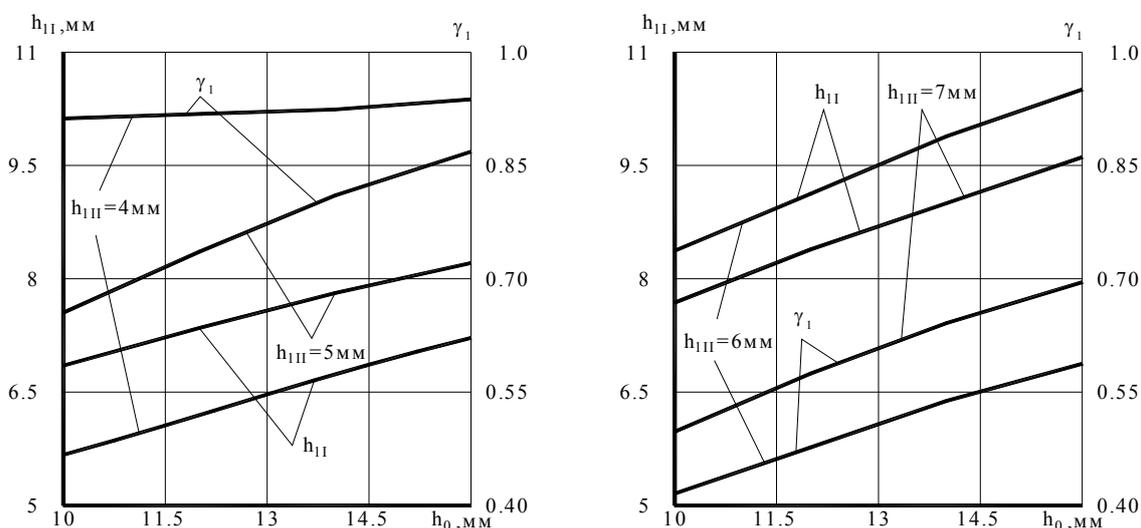


Рис. 5. Расчетные зависимости результирующей толщины композиции после первичной прокатки и конечной относительной плотности порошковой составляющей от исходной и конечной толщины композиции до и после прокатки

Приведенные расчетные зависимости позволяют определять необходимую исходную толщину порошкового сердечника при заданных конечной относительной плотности порошка, результирующих толщин порошковой ленты и исходной толщины материала оболочки. Такие же зависимости можно получить для различных материалов оболочки и порошкового сердечника, а также для различных исходных значений плотности порошка. С практической точки зрения результаты автоматизированного проектирования технологических режимов прокатки позволяют без использования математического аппарата определить все исходные параметры процесса для получения заданного типоразмера порошковой ленты.

## ВЫВОДЫ

Численная реализация разработанной математической модели процесса прокатки порошковой ленты позволяет осуществить автоматизированное проектирование технологических режимов, то есть определить обжатия при заданных значениях конечной толщины ленты и относительной плотности порошкового сердечника. Результаты проектирования показывают монотонный характер зависимости исходной толщины порошкового сердечника ленты от его конечной относительной плотности.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Чигарев В. В. Исследование химической неоднородности при наплавке порошковой плющенькой / В. В. Чигарев // Тез. докл. научн.-техн. конференции «Университет – городу». – Мариуполь : ПГТУ, 2006. – т. II. – С. 89–90.
- 2 Seshadev Sahoo. High Speed Twin Roll Casting of Aluminum-Copper Strips with Layered Structure / Seshadev Sahoo, Amitesh Kumar, B. K. Dhinda, Sudipto Ghosh // *Materials and Manufacturing Processes*. – 2013. – Volume 28. – P. 61–65. DOI : 10.1080/10426914.2012.700161.
- 3 Seshadev Sahoo. Modeling and Experimental Validation of Rapid Cooling and Solidification during High-Speed Twin-Roll Strip Casting of Al-33 wt pct Cu / Seshadev Sahoo, Amitesh Kumar, B. K. Dhindaw, Sudipto Ghosh // *Metallurgical and Materials Transactions*. – 2012. – Volume 43. – Issue 4. – P. 915–924.
4. Production of Titanium Powder Sheets by Asymmetric Rolling / K. A. Gogaev, V. S. Voropaev, G. Ya. Kalutskii, Yu. N. Podrezov, D. G. Verbilo, O. S. Koryak // *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. – 2012. – Volume 9–10 (487). – P. 11–23. DOI : 10.1007/s11106-013-9462-5.
- 5 Кулешов И. Е. Методика расчета энергосиловых параметров прокатки биметаллических материалов из порошков // *Сталь*. – 1989. – № 9. – С.90–93.
6. Stress state and kinematics for rolling of powered materials on metal substrate / V. F. Potapkin, A. N. Levkin, A. V. Satonin, S. M. Romanov, Yu. A. Vorob'yev, E. P. Gribkov // *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. – 2000. – Volume 39 (1-2). – P. 11–17. DOI : 10.1007/BF02677434.
- 7 Gribkov E. P. Mathematical modelling stress-strain behavior at rolling of the compositions including powder materials / E. P. Gribkov, V. A. Danilyuk // *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*, 2013. – № 5 (45). – P. 42–46.
- 8 Чигарев В. В. Математическая модель процесса прокатки порошковой ленты / В. В. Чигарев, А. Г. Белик, Э. П. Грибков, П. А. Гавриш // *Сварочное производство*, 2014. – № 1 (950). – С.21–26.

## REFERENCES

- 1 Chigarev V. V. Issledovanie himicheskoy neodnorodnosti pri naplavke poroshkovej pljushhenkoj / V. V. Chigarev // *Tez. dokl. nauchn.-tehn. konferencii «Universitet – gorodu»*. – Mariupol' : PGU, 2006. – t. II. – S. 89–90.
- 2 Seshadev Sahoo. High Speed Twin Roll Casting of Aluminum-Copper Strips with Layered Structure / Seshadev Sahoo, Amitesh Kumar, B. K. Dhinda, Sudipto Ghosh // *Materials and Manufacturing Processes*. – 2013. – Volume 28. – P. 61–65. DOI : 10.1080/10426914.2012.700161.
- 3 Seshadev Sahoo. Modeling and Experimental Validation of Rapid Cooling and Solidification during High-Speed Twin-Roll Strip Casting of Al-33 wt pct Cu / Seshadev Sahoo, Amitesh Kumar, B. K. Dhindaw, Sudipto Ghosh // *Metallurgical and Materials Transactions*. – 2012. – Volume 43. – Issue 4. – P. 915–924.
4. Production of Titanium Powder Sheets by Asymmetric Rolling / K. A. Gogaev, V. S. Voropaev, G. Ya Kalutskii, Yu. N. Podrezov, D. G. Verbilo, O. S. Koryak // *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. – 2012. – Volume 9–10 (487). – P. 11–23. DOI : 10.1007/s11106-013-9462-5.
- 5 Kuleshov I. E. Metodika rascheta jenergosilovyh parametrov prokatki bimetallicheskih materia-lov iz poroshkov // *Stal'*. – 1989. – № 9. – S.90–93.
6. Stress state and kinematics for rolling of powered materials on metal substrate / V. F. Potapkin, A. N. Levkin, A. V. Satonin, S. M. Romanov, Yu. A. Vorob'yev, E. P. Gribkov // *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. – 2000. – Volume 39 (1-2). – P. 11–17. DOI : 10.1007/BF02677434.
- 7 Gribkov E. P. Mathematical modelling stress-strain behavior at rolling of the compositions including powder materials / E. P. Gribkov, V. A. Danilyuk // *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*, 2013. – № 5 (45). – P. 42–46.
- 8 Chigarev V. V. Matematicheskaja model' processa prokatki poroshkovej lenty / V. V. Chigarev, A. G. Belik, Je. P. Gribkov, P. A. Gavrich // *Svarochnoe proizvodstvo*, 2014. – № 1 (950). – S.21–26.

Грибков Э. П.

– доц., канд. техн. наук, докторант каф. АММ ДГМА

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

E-mail: [amm@dgma.donetsk.ua](mailto:amm@dgma.donetsk.ua)