

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА СРЕДНЕГО КОНТАКТНОГО ДАВЛЕНИЯ ПРИ ПРОКАТКЕ МЕДНО-АЛЮМИНИЕВЫХ ЛИСТОВ

В. Г. Загорянский

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: zagor_vlad@ukr.net

Расширение возможностей использования прокатного оборудования для холодной прокатки биметаллических листов из цветных металлов и сплавов связано с использованием простой и достоверной методики расчета энергосиловых параметров. Анализ известных методик показал, что для расчета среднего контактного давления наиболее применима методика Стоуна. Использование близкой по результатам методики Гелеи требует дополнительных исследований. Различие в рассчитанных по этим методикам значениях давления и экспериментальных значениях для случая прокатки трехслойной композиции алюминий–медь–алюминий составляет 20–25%. Обоснованы расчетные значения и зависимости для определения входящих в эти методики определяющих параметров.

Ключевые слова: холодная прокатка, биметалл, алюминий, медь, среднее контактное давление, методика расчета.

ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ СЕРЕДНЬОГО КОНТАКТНОГО ТИСКУ ПРИ ПРОКАТЦІ МІДНО-АЛЮМІНІЄВИХ ЛИСТІВ

В. Г. Загорянский

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: zagor_vlad@ukr.net

Розширення можливостей використання прокатного обладнання для холодної прокатки біметалічних листів і штаб із кольорових металів і сплавів пов'язано з використанням простої та достовірної методики розрахунку енергосилових параметрів. Аналіз відомих методик показав, що для розрахунку середнього контактного тиску найбільш прийнятна методика Стоуна. Використання близької за результатами методики Гелеї потребує додаткових досліджень. Різниця в розрахованих за цими методиками значеннях тиску та експериментальних значеннях для випадку прокатки тришарової композиції алюміній–мідь–алюміній складає 20–25 %. Обґрунтовані розрахункові значення та залежності для визначення параметрів, які входять до цих методик.

Ключові слова: холодна прокатка, біметал, алюміній, мідь, середній контактний тиск, методика розрахунку.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Методика расчета нагрузок на механизмы и детали прокатного оборудования при получении прокаткой определенного диапазона размеров и механических свойств полупродуктов, максимально адекватно отображающая воздействие влияющих факторов, определяет выбор оборудования и возможности его рационального использования. Это в полной мере относится и к таким специфическим процессам, как получение холодной прокаткой биметаллических листов из цветных металлов и сплавов. Технологические рекомендации по прокатке листов и других полуфабрикатов из цветных металлов и сплавов приведены в работах [1–4].

Отметим, что результаты исследований энергосиловых параметров при прокатке монометаллов из цветных металлов и сплавов обобщены в немногочисленных работах, например [4–8].

Результаты же таких исследований по прокатке листового биметалла из цветных металлов и сплавов разбросаны по различным источникам, каждый из которых освещает определенные сочетания цветных металлов и сплавов и диапазоны размеров. В частности, для биметалла алюминий + медь – это работы [9] (экспериментальное определение удельных давлений при холодной прокатке листов алюминий АД1 + медь М1 + алюминий АД1, обоснование расчетной зависимости), [10] (влияние исходного соотношения толщин слоев и суммарной толщины паке-

та алюминий А000 + медь электротехническая на деформационные и силовые параметры процесса), [11] (распределение общего обжатия между слоями пакета и другие параметры для тех же материалов, получены кривые упрочнения меди и алюминия при прокатке пакетов).

В работе [12] приводятся параметры слоистых металлов (полосы и ленты) для электротехнической промышленности:

- композиция алюминий АД + медь М1 общей толщиной 1,5 мм с толщиной лакирующего слоя 0,1...0,4 мм и шириной 50 мм для электрических цепей;
- композиция медь М1 + алюминий АД0 + медь М1 общей толщиной 5...20 мм с толщиной лакирующего слоя 0,25...0,8 мм и шириной 50...600 мм для шинопроводов.

Геометрические параметры полуфабрикатов последней композиции – М1 + алюминий АД0 + медь М1 (листы и плиты биметаллических для электротехнических изделий) приведены в той же работе [12] (табл. 1).

Медные лакирующие листы располагают в середине продольной оси листов и плит основы.

Известно также, что еще в 60-х годах прошлого века было освоено производство биметалла в виде небольших листов и полос из алюминия, лакированного медью. Толщина лакирующего слоя меди при одностороннем лакировании составляла 10; 20;

30; 40 и 50 %; при двухстороннем плакировании 10; 15; 20 и 25 % с каждой стороны.

Таблица 1 – Листы и плиты биметаллические медь М1+алюминий АД0+медь М1 для электротехнических изделий [12]

| Толщина и допуск, мм | | Ширина и допуск, мм | | Длина (кратная) и допуск, мм (но не менее 300 мм) |
|----------------------|-------------------|---------------------|---------------------------|---|
| биметалла | плакирующего слоя | алюминиевой основы | медного плакирующего слоя | |
| 10±0,5 | 0,25...0,8 | 600 ⁺¹⁵ | 300 ⁺¹⁵ | 100 ⁺²⁰ ₋₅ |
| 18±1,5 | 0,25...0,8 | 700 ⁺¹⁵ | 190 ⁺¹⁵ | 190 ⁺²⁰ ₋₅ |
| 20±1,5 | 0,25...0,8 | 230 ⁺¹⁵ | 230 ⁺¹⁵ | 230 ⁺²⁰ ₋₅ |

В работе [9] при исследованиях использовался реверсивный четырехвалковый стан 2840 с диаметром рабочих валков 620 мм, предназначенный для холодной прокатки листов из алюминиевых сплавов с пределом текучести до 400 МПа в нагартованном состоянии. Прокатывались пакеты толщиной от 14,82...8,53 мм до толщин листа 3,15...4,4 мм, что при обжати за плакировочный проход 65...75% создавало средние удельные давления до 500 МПа.

Отмечается [13], что реверсивные четырехвалковые станы холодной прокатки, по конструкции аналогичные непрерывным, применяют при широком размерном сортаменте сплавов и небольшом объеме производства (50...120 тыс. т/год). В работе [4] дана техническая характеристика типовых станом холодной прокатки алюминия и его сплавов. Так, для одноклетового реверсивного стана приводятся следующие параметры: диаметр рабочих валков – 650 мм, опорных – 1400 мм; длина бочки валков – 2800 мм, скорость прокатки – 4 м/с; исходные толщины листов – 6...4 мм, конечные – 3...0,5 мм; мощность стана – 4000 кВт.

В связи с тем, что, с одной стороны, холодная прокатка биметаллических листов требует больших обжатий за плакировочный проход, что создает значительные давления металла на валки, требуя мощного оборудования, а с другой стороны, прокатка некоторых типоразмеров листов возможна и на менее мощном оборудовании, необходим расчет давлений в каждом конкретном случае.

Методик расчета энергосиловых параметров при холодной прокатке в литературе описано немало, в том числе и для случая прокатки цветных металлов и сплавов, [8, 14, 15], однако имеется необходимость в адаптации их к особенностям прокатки биметаллических листов из цветных металлов и сплавов.

Основой для расчетов силы прокатки и производных от нее величин момента, работы и мощности прокатки являются значения контактной площади прокатываемого металла с валками и среднее контактное давление.

Таким образом, для рационального выбора параметров оборудования для прокатки биметаллических листов из цветных металлов и сплавов необходима адаптация для этого случая известных аналитических методик расчета среднего контактного давления при холодной прокатке.

Цель работы – выбор наиболее простых и достаточно надежных методик расчета среднего контактного давления при холодной прокатке из совокупности известных аналитических методик для случая прокатки биметаллических листов из цветных металлов и сплавов.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.

Рекомендуются [16] следующие основные методы определения давления металла на валки при холодной прокатке – формулы А.И. Целикова, А.А. Королева, Е.С. Рокотяна, М. Стоуна. При расчете по эмпирическим формулам Эжелунда или Ш. Гелеи следует учитывать, что эти формулы не могут иметь обобщенного характера и область их применения ограничена условиями, в которых получены входящие в них коэффициенты [17].

Отметим, что формулы Целикова, Королева и Рокотяна включают в себя большое число коэффициентов и громоздки. Наиболее просты и достаточно надежны формулы Стоуна и Ш. Гелеи. Отметим, что в работе [8], в которой приведены блок-схемы и примеры расчетов усилий при холодной прокатке по различным методикам, методика Ш. Гелеи не рассматривается.

Одной из простейших зависимостей для нахождения среднего контактного давления при холодной прокатке монометалла является формула Стоуна [17]:

$$P_{cp} = \frac{(2\tau_s - \sigma)h_{cp}}{\mu l'_c} \left(e^{\frac{\mu l'_c}{h_{cp}}} - 1 \right) u = \frac{v \Delta h}{l_\partial H}, \quad (1)$$

где μ – коэффициент трения. При холодной прокатке цветных металлов и сплавов коэффициент трения можно определить по данным работы [14] (табл. 2).

Таблица 2 – Величина коэффициентов трения при холодной прокатке [14]

| Материал | Без смазки | Смазка | |
|----------|-------------|-------------|-------------------|
| | | керосин | минеральное масло |
| Медь | 0,2...0,25 | 0,13...0,15 | 0,1...0,13 |
| Алюминий | 0,2...0,3 | 0,1...0,15 | 0,08...0,09 |
| Латунь | 0,12...0,15 | 0,06 | 0,05 |

Отметим, что аналогичные значения коэффициента трения (близко к 0,15) стальных валков (сталь 9Х2) по алюминиевой двухсторонней плакировке приведены в работе [9] (указывается, что в качестве смазки применялись олеиновое масло или технический вазелин).

В формуле (1) $2\tau_s$ определяется по зависимости [17]

$$2\tau_s = \frac{1,15(\sigma_s^0 + \sigma_s^1)}{2}, \quad (2)$$

где σ_s^0 и σ_s^1 – предел текучести металла до и после деформации;

$$\sigma = \frac{\sigma_0 + \sigma_1}{2}, \quad (3)$$

где σ_0 – напряжение в прокатываемой полосе при входе в валки, σ_1 – напряжение в прокатываемой полосе при выходе из валков. Выражение в первых скобках формулы (1) представляет собой сопротивление деформации сжатия.

Среднюю толщину h_{cp} полосы в очаге деформации обычно определяют с достаточной точностью как среднеарифметическую толщину [18]

$$h_{cp} = \frac{h_0 + h_1}{2}, \quad (4)$$

где h_0 – толщина полосы (пакета) при входе в валки, h_1 – толщина полосы (пакета) после обжатия в валках.

Параметр l'_c – длину дуги захвата с учетом сплющивания валков (деформированную дугу контакта) – рекомендуется определять по номограмме, приведенной в работе [8].

По другому подходу длину дуги захвата с учетом упругого сплющивания валков l'_c рассчитывают по итерационной методике [18]

$$l'_c = x + \sqrt{R \cdot \Delta h + x^2}, \quad (5)$$

где R – радиус валка; Δh – абсолютное обжатие; $\sqrt{R \cdot \Delta h} = l$ – длина дуги захвата. Параметр x (приращение длины дуги захвата в результате сплющивания валка) вычисляется по формуле Хичкока (p_{cp} подставляется в Н/мм². Для стальных валков формула имеет вид:

$$x = \frac{p_{cp} R}{95000}. \quad (6)$$

Используют итерационную схему расчета l'_c [18]: вычисляется значение l_c без учета сплющивания ($x = 0$), по которому вычисляется p_{cp} , затем x и l'_c . Полученное значение l'_c используют для нового расчета значений p_{cp} и l'_c . Цикл повторяется до тех пор, пока старое значение l'_c не совпадет с полученным. Совпадение с приемлемой точностью достигается обычно после двух-трех итераций.

Отметим, что в работах, посвященных исследованию энергосиловых параметров при прокатке биметаллических листов (в частности, композиций алюминий + медь + алюминий [9]) для случая прокатки биметалла (1) приводится зависимость

$$p_{cp} = \frac{k}{m} (e^m - 1), \quad (7)$$

которая, как следует из приведенного ниже, является видоизмененной зависимостью Стоуна (1).

В зависимости (7) k – предел текучести на протяжении всего пояса деформации, в случае прокатки 3-хслойного симметричного биметалла

$$k = \frac{\sigma_s + \sigma_s^{2-1-2}}{2}, \quad (8)$$

где средний предел текучести материала пакета до прокатки определяется по зависимости

$$\sigma_s = \frac{\sigma_s^1 h_{01} + \sigma_s^2 2h_{02}}{h_{01} + 2h_{02}}, \quad (9)$$

где σ_s^1 и σ_s^2 – пределы текучести до деформации металлов среднего и наружного слоев соответственно; h_{01} , h_{02} – толщины до деформации слоев металла среднего и наружного слоев соответственно; σ_s^{2-1-2} – предел текучести биметаллического листа после прокатки.

Показатель деформации

$$m = \mu \frac{l'_c}{h_{cp}}. \quad (10)$$

Величины пределов текучести компонентов прокатываемого пакета (в данном случае алюминия и меди) рекомендуется принимать по кривым упрочнения, приведенным, например, в работе [11].

В частности, предел текучести отожженной меди М1 по результатам измерений работы [9] составляет 76...77 МПа, отожженного алюминия АД1 – 40...41 МПа, нагартованного алюминия АД1 – 79 МПа. Таким образом, средний предел текучести материала пакета до прокатки (данные работы [9]) при толщине листа меди 9,7 мм, а каждого из двух листа алюминия 2,56 мм, в соответствии с формулой (9), составит 65 МПа.

Отметим, что на основе правила смесей [12] свойства биметалла можно прогнозировать на основе известных свойств его составляющих по следующей линейной зависимости (для биметалла, состоящего из двух слоев)

$$y_{12} = y_1 a + y_2 (1 - a), \quad (11)$$

где y_{12} – прогнозируемое свойство биметалла; y_1 и y_2 – свойства исходных составляющих биметалла; $a = h_{0i}/h_0$ – отношение исходной толщины одного из компонентов к исходной толщине всей композиции.

Таким образом, предел текучести биметалла, состоящего из двух слоев, на основе значений пределов текучести σ_{s1} и σ_{s2} его составляющих и соотношения их толщин можно оценить по зависимости

$$\sigma_{s12} = \sigma_{s1} a + \sigma_{s2} (1 - a). \quad (12)$$

Для приведенных выше толщин слоев $a = 9,7/14,82 = 0,65$. Тогда σ_{s12} будет равно 64,5 МПа, что соответствует полученному по формуле (9).

Затруднение возникает, таким образом, только с определением предела текучести биметаллического листа после прокатки. Отметим, что для листа с

приведенными выше параметрами (исходной толщиной 14,82 мм) прокатанный лист имеет параметры: общая толщина – 3,71 мм (обжатие 75,1 %), толщина слоя меди 2,5 мм, алюминия – 0,6 мм. Предел текучести полученного биметалла составил 327 МПа, т.е. в пять раз выше.

Довольно простая эмпирическая формула для расчета среднего контактного напряжения предложена Ш. Гелеи [16].

По формуле Ш. Гелеи [19]

$$k_m = k_f \left(1 + C\mu \frac{l_d}{h} \sqrt[4]{v} \right), \quad (13)$$

где k_m – среднее удельное давление; k_f – сопротивление линейной деформации; C – коэффициент, зависящий от отношения l_c/h [16]; μ – коэффициент трения; l_c – длина дуги захвата; v – окружная скорость валков (скорость прокатки).

Применимость этой формулы для случая холодной прокатки неоднозначна. Одними исследователями [9] эта формула используется, и полученные по ней величины среднего контактного давления для рассматриваемого биметалла близки к экспериментальным (величина сопротивления деформации k_f принимается по зависимости (6)), другими исследователями эта формула однозначно относится к случаю горячей прокатки [16, 17].

Средние контактные давления, рассчитанные по формулам Стоуна и Гелеи при аналогичных условиях для рассматриваемой композиции составляют 275 и 304 МПа, экспериментально получено значение 373 МПа, то есть отличие составляет 25 и 18 % соответственно.

ВЫВОДЫ. Анализ методик расчета среднего контактного давления при холодной прокатке биметаллических листов из цветных металлов и сплавов (на примере композиции алюминий–медь–алюминий) показал, что методика Стоуна наиболее применима для практического использования (применимость методики Гелеи требует дополнительных исследований). Для исследованной композиции обоснованы выбор параметров и определены их значения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Берман С.И. Прокатка листов и лент из тяжелых цветных металлов. – М.: Металлургия, 1977. – 264 с.
2. Колпашников А.И. Прокатка листов из легких сплавов. – М.: Металлургия, 1979. – 264 с.
3. Зиновьев А.В. Производство проката цветных металлов и сплавов // Итоги науки и техники. Серия "Прокатное и волочильное производство". – Т. 10. – М.: ВИНТИ АН СССР, 1980. – С. 81–127.
4. Технология процессов обработки металлов

давлением / П.И. Полухин, А. Хензель, В.П. Полухин [и др.]; под ред. П.И. Полухина. – М.: Металлургия, 1988. – 408 с.

5. Крейндин Н.Н. Расчет обжатий при прокатке цветных металлов. – М.: Металлургиздат, 1963. – 407 с.

6. Энергосиловые параметры прокатки цветных металлов и сплавов / И.Я. Тарновский, М.Я. Бровман, В.Н. Серебренников и др. – М.: Металлургия, 1975. – 136 с.

7. Технология обработки давлением цветных металлов и сплавов / Ю.П. Глебов, А.П. Зиновьев. – М.: Институт стали и сплавов, 1981. – 74 с.

8. Расчет параметров листовой прокатки: справочник / Ю.В. Коновалов, А.Л. Остапенко, В.И. Пономарев. – М.: Металлургия, 1986. – 430 с.

9. Исследование энергосиловых параметров при прокатке биметаллических листов алюминий + медь + алюминий / И.Г. Кирпа, Н.П. Колесников, В.А. Панкин, Ю.А. Шишкин // Цветные металлы. – 1963. – № 3. – С. 60–65.

10. Экспериментальное исследование механики прокатки биметалла / П.И. Полухин, А.В. Архангельский, Ю.В. Кнышев, В.А. Мастеров // Известия вузов. Черная металлургия. – 1965. – № 8. – С. 73–79.

11. Некоторые особенности прокатки слоистой полосы / П.И. Полухин, А.В. Архангельский, Ю.В. Кнышев, В.А. Мастеров // Известия вузов. Черная металлургия. – 1965. – № 10. – С. 80–83.

12. Биметаллы / Л.Н. Дмитриев, Е.В. Кузнецов, А.Г. Кобелев и др. – Пермь: Пермское книжное изд., 1991. – 415 с.

13. Машины и агрегаты металлургических заводов. В 3-х томах. Т. 3 Машины и агрегаты для производства и отделки проката / А.И. Целиков, П.И. Полухин, В.М. Гребенник и др. – М.: Металлургия, 1988. – 680 с.

14. Расчет энергосиловых параметров в процессах обработки металлов давлением / А. Хензель, Т. Шпиттель. – М.: Металлургия, 1982. – 360 с.

15. Василев Я.Д. Инженерные методы и алгоритмы расчета параметров холодной прокатки. – М.: Металлургия, 1995. – 368 с.

16. Энергосиловые параметры обжимных и листовых станов / Е.С. Рокотян, С.Е. Рокотян. – М.: Металлургия, 1968. – 270 с.

17. Теория прокатки: справочник / А.И. Целиков, А.Д. Томленов, В.И. Зюзин и др. – М.: Металлургия, 1982. – 335 с.

18. Теория и технология прокатного производства / А.И. Рудской, В.А. Лунев. – СПб.: Наука, 2005. – 540 с.

19. Целиков А.И. Теория расчета усилий в прокатных станах. – М.: Металлургиздат, 1962. – 495 с.

JUSTIFICATION OF THE CHOICE METHOD OF CALCULATION OF SECONDARY CONTACT

PRESSURE ROLLING OF COPPER-ALUMINUM SHEETS

V. Zagoryansky

Kremenchuk Mychailo Ostrohradskyi National University

vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: zagor_vlad@ukr.net

Empowerment of use of rolling equipment for cold rolling of bimetallic sheets of non-ferrous metals and alloys is associated with the use of simple and reliable calculation method of power parameters. Analysis of the known methods has shown that to calculate the average contact pressure is most applicable Stone method. Using similar in results Gelei method requires additional researches. The difference in the pressures calculated by these methods and experimental values for the case of rolling three-layered composition of the aluminum-copper-aluminum is 20–25%. Calculation values and according to the definition included in these techniques are justified the governing parameters.

Key words: cold rolling, bimetal, aluminum, copper, average contact pressure, calculation method.

REFERENCES

- Berman, S.I. (1977) *Prokatka listov i lent iz tyazhelyh tsvetnykh metallov* [Rolling of plates and straps of heavy non-ferrous metals], Metallurgiya, Moscow, USSR.
- Kolpashnikov, A.I. (1979) *Prokatka listov iz legkih splavov* [Rolling of plates of light non-ferrous alloys], Metallurgiya, Moscow, USSR.
- Zinov'ev, A.V. (1980) "Manufacture of rolled metal of non-ferrous metals and alloys", *Itogy nauki i tekhniki. Seriya "Prokatnoe proizvodstvo"*, vol. 10, pp. 81–127.
- Poluhin, P.I., Henzel, A., Poluhin V.P. and others (1988) *Technologiya protsessov obrabotki metallov davleniem* [Technology of processes of pressure treatment of metals], Metallurgiya, Moscow, USSR.
- Kreidlin, N.N. (1963) *Raschet obzhatij pri prokatke tsvetnykh metallov* [Calculation of cobbing in rolling of non-ferrous metals], Metallurgizdat, Moscow, USSR.
- Tarnovskij, I.Ya., Brovman, M.Ya, Serebrennikov, V.N and others (1975) *Energosilovye parametry prokatki tsvetnykh metallov i splavov* [Energy-power parameters of rolling of non-ferrous metals and alloys], Metallurgiya, Moscow, USSR.
- Glebov, Yu.P. and Zinov'ev, A.P. (1981) *Technologiya obrabotki davleniem tsvetnykh metallov i splavov* [Technology of pressure treatment of non-ferrous metals and alloys], Metallurgiya, Moscow, USSR.
- Konovalov, Yu. V., Ostapenko, A. L., Ponomarev, V.I. (1986) *Raschet parametrov listovoy prokatki* [Calculation of parameters of the sheet rolling], Metallurgiya, Moscow, USSR.
- Kirpa, I.G., Kolesnikov, N.P., Pankin, V.A., Shishkin, Ya.A. (1963) "Research of energy-power parameters at rolling of bimetal plates aluminum + copper + aluminum", *Tsvetnye metally*, vol. 3, pp. 60–65.
- Poluhin, P.I., Arhangel'skij, A.V., Knyshev, Yu.V., Masterov, V.A. (1965) "Experimental research of mechanics of rolling of bimetal", *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*, vol. 8, pp. 73–79.
- Poluhin, P.I., Arhangel'skij, A.V., Knyshev, Yu.V., Masterov, V.A. (1965) "Some features of rolling of layered strip", *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*, vol. 10, pp. 80–83.
- Dmitrov, L.N., Kuznetsov, E.V., Kobelev, A.F. and others (1991) *Bimetally* [Bimetals], Permskoe knizhnoe izd., Perm, USSR.
- Tselikov, A.I., Poluhin, P.I., Grebennik, V.M. and others (1988) *Mashiny i agregaty metallurgicheskikh zavodov. V 3-h tomah. T. 3 Mashiny i agregaty dlya proizvodstva i otdelki prokata* [Machines and aggregates of metallurgical plants. In 3 vol. vol. 3. Machines and aggregates for manufacturing and finishing of rolled metals], Metallurgiya, Moscow, USSR.
- Henzel' A. and Shpittel' T. (1982) *Raschet energosilovykh parametrov v protsessah obrabotki metallov davleniem* [Calculation of energy-power parameters in processes of pressure treatment], Metallurgiya, Moscow, USSR.
- Vasilev, Ya. D. (1995) *Inzhenernye metody i algoritmy rascheta parametrov holodnoy prokatki* [Engineer methods and algorithmes of calculation of cold rolling parameters], Metallurgiya, Moscow, Russia.
- Rokotyan, E.S. and Rokotyan, S.E. (1968) *Energosilovye parametry obzhimnykh i listovykh stanov* [Energy-power parameters of cobbing and plate rolling mills], Metallurgiya, Moscow, USSR.
- Tselikov, A.I., Tonlenov, A.D., Zyuzin, V.I. and others (1982) *Teoriya prokatki* [Theory of rolling], Metallurgiya, Moscow, USSR.
- Rudskoy A. I. and Lunev V. A. (2005) *Teoriya i tekhnologiya prokatnogo proizvodstva* [Theory and technology of rolling production], Nauka, Saint Petersburg, Russia.
- Tselikov, A.I. (1962) *Teoriya rascheta usilij v prokatnykh stanah* [Theory of calculation of strains in rolling mills], Metallurgiya, Moscow, USSR.

Стаття надійшла 28.10.2014.