

РАЗДЕЛ III ПРОЦЕССЫ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ В МЕТАЛЛУРГИИ

УДК 621.771

Огинский И. К.
Ремез О. А.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННО-СКОРОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ НЕПРЕРЫВНОЙ СОРТОВОЙ ПРОКАТКИ

Современные сортовые станы в большинстве своем являются непрерывными. При их создании приоритетной задачей в части технологии становится создание рациональных скоростных режимов прокатки. Необходимым становится определение комплекса деформационных и кинематических параметров в их взаимосвязи. Решению этих задач посвящены многие работы [1–9 и др.], но для практических целей достигнутые результаты являются недостаточными. Результаты были получены на упрощенной или недостаточно аргументированной основе. Необходимы новые решения на более глубокой физической и технологической основе.

Целью настоящей работы является анализ существующих подходов к определению параметров непрерывной прокатки, выявление ее кинематических особенностей, уточнение применимости существующих методов расчета кинематических параметров, разработка предложений по совершенствованию методов расчета скоростных режимов прокатки.

Процесс непрерывной прокатки подчиняется известному закону постоянства секундных объемов, который имеет вид:

$$V_1 F_1 = V_2 F_2 = \dots = V_n F_n, \quad (1)$$

где V и F – скорость прокатки и площади поперечных сечений раскатов в проходах, соответственно; индексы означают номер клетей (проходов).

Точность определения каждого произведения в выражении (1) должна быть достаточно высокой, в свою очередь, для ее достижения требуется высокая точность определения каждого из сомножителей. Определение площади поперечных сечений напрямую зависит от точности определения уширения, в то же время, методы его определения являются весьма приближенными. Для непрерывной прокатки необходимым становится кроме всего учет формоизменения в межклетевых промежутках. Определению межклетевых деформаций и их взаимосвязей со скоростными и силовыми параметрами посвящены работы [10–14], однако полученные в них сведения являются недостаточными.

Скорость выхода металла из валков определяют по выражению:

$$V_i = \frac{\pi}{60} \cdot D_{k_i} \cdot n_i \cdot (1 + S_i), \quad (2)$$

где V_i – скорость выхода металла из валков;

D_{k_i} – катающий диаметр валков;

n_i – частота вращения валков;

S_i – опережение, отнесенное к диаметру D_{k_i} .

Основой определения скорости прокатки в калибрах является определение катающего диаметра (радиуса). Проблема его расчета возникла у исследователей, начиная с появления непрерывной прокатки. В настоящее время проблема не утратила своей остроты, напротив, с увеличением скорости прокатки приобрела новые формы, для которых характерен рост динамических нагрузок в главных линиях станов при переходных процессах заполнения очага деформации металлом и его освобождения. Методы определения катающего диаметра разнообразны и сформированы достаточно давно, они приводятся, в частности, в работах А. П. Виноградова [15]. В работах более позднего [16–17] и настоящего периодов времени [4, 18–20] принципиальные дополнения и изменения не приводятся. Разнообразие методов сви-

детельствует об отсутствии единого подхода к определению катающего радиуса. Все методы построены на геометрических соотношениях, и понятие «катающий диаметр» в устоявшемся виде не отражает кинематические явления, происходящие в очаге деформации.

Все существующие методы расчета катающего радиуса, основанные на геометрических соотношениях, не отражают физическую сторону взаимодействия полосы и валков, не учитывают кинематику перемещения металла и инструмента. Все методы расчета скоростных режимов прокатки на основе катающего диаметра включают необходимость определения опережения, которое является трудноопределимым фактором, с недостаточно выясненной природой образования даже при прокатке на гладкой бочке [21, 22]; для случаев деформации в калибрах опережение приобретает еще более физически нечеткие признаки и количественную неопределенность. Опережение при прокатке в калибрах, будучи неоднозначным параметром [21, 22], в свою очередь, приводит выражение (2) к еще более неоднозначному виду.

Предлагается метод определения катающего диаметра, в основе которого лежит кинематическая взаимосвязь валков и выходящего из них раската [23]. Под катающим радиусом понимается условный радиус, соответствующий скорости полосы V_1 после выхода ее из валков:

$$R_k = \frac{L}{\varphi}, \quad (3)$$

где L – расстояние, которое прошла полоса за период поворота вала на угол φ (в общем случае угол φ может быть произвольным).

Предлагаемый подход при расчетах скоростных параметров исключает необходимость определения опережения для случаев прокатки в вытяжных калибрах. Сущность метода поясняется схемой на рис. 1.

Исключение S_k позволяет придать определенность катающему диаметру, выражение (2) при этом приобретает вид:

$$V_i = \frac{\pi}{60} \cdot D_{k_i} \cdot n_i \quad (4)$$

Предложенный метод не может быть использован напрямую в виде выражения (3), поскольку включает две неизвестные величины L и φ . Метод является экспериментально-расчетным, то есть, комбинированным. Одна из величин (L или φ) должна быть задана, значения второй величины предполагается получать из опытных данных. В качестве последних могут быть использованы, например, результаты компьютерного моделирования.

В соответствии с предложенным подходом выполнены теоретические исследования катающего диаметра в вытяжных системах калибров [23] с использованием программы компьютерного моделирования процессов пластической деформации Forge 3D®, разработанной SEMEF, Ecole des Mines de Paris. Forge 3D® основан на вариационном принципе Лагранжа, функционал которого сформулирован следующим образом:

$$I = \int_V \left(\int_0^H T dH \right) dV - \int_V F_i U_i dV - \int_S f_i U_i dS, \quad (5)$$

где T – интенсивность касательных напряжений; H – интенсивность скоростей деформации сдвига;

F_i, f_i, U_i – соответственно проекции векторов объемных сил, поверхностных нагрузок и скоростей течения;

S – площадь поверхности;

V – объем.

Напряжение текучести (сопротивление деформации) деформируемого материала задавалось на основе зависимости Хензеля-Шпиттеля [24]:

$$\sigma_T = A \cdot e^{a_1 T} \cdot T^{a_9} \cdot \varepsilon^{a_2} \cdot e^{a_4 / \varepsilon} \cdot (1 + \varepsilon)^{a_5 T} \cdot e^{a_7 \varepsilon} \cdot \dot{\varepsilon}^{a_3} \cdot \dot{\varepsilon}^{a_8 T}, \quad (6)$$

где σ_T – сопротивление деформации;

ε – степень деформации;

$\dot{\varepsilon}$ – скорости деформации;

T – температура;

$A, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8, a_9$ – коэффициенты регрессии.

Для характеристики напряжений трения на контакте использовалась зависимость на основе закона Амонтона в следующей форме:

$$\tau = \mu \cdot \sigma_n, \quad (7)$$

при
$$\mu \cdot \sigma_n < \frac{\sigma_T}{\sqrt{3}} \quad (8)$$

где μ – коэффициент трения;

σ_n – напряжение по нормали к контактной поверхности в узле сетки конечных элементов;

τ_n – напряжение внешнего трения [25].

Программа Forge 3D не предназначена для прямого использования подобной задачи, по этой причине вначале было проведено ее тестирование с целью выявить ее возможности. Были использованы имеющиеся опытные данные по исследованию уширения на гладкой бочке и в калибрах простой формы. Сравнение результатов расчета и компьютерного моделирования показали их удовлетворительную сходимость и тем самым подтвердилась возможность использования программы Forge 3D для решения поставленной задачи.

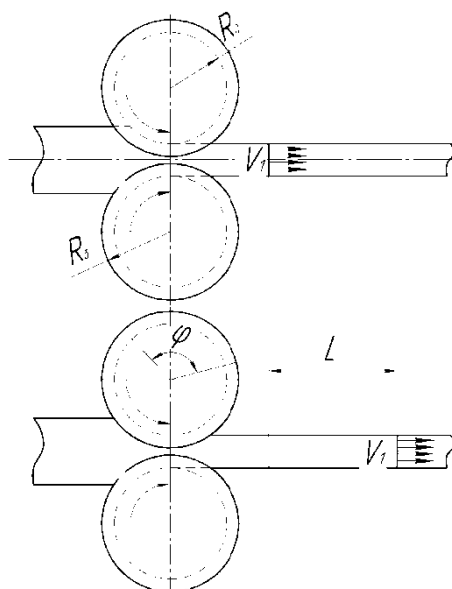


Рис. 1. К методу определения катающего радиуса: R_b – радиус валка по бурту; R_d – радиус валка по дну калибра; L – расстояние, проходимое раскатом за период поворота валка на угол φ (базовое расстояние); φ – угол поворота валка

Разработан алгоритм расчета параметров прокатки на основе предложенного подхода с использованием программного пакета Forge 3D. Алгоритм, в частности, учитывает переднее и/или заднее натяжение при прокатке. Выявлены закономерности изменения отношения катающего диаметра к диаметру по бурту в зависимости от параметров прокатки для систем калибров ромб-квадрат, овал-квадрат и овал-круг. Установлено, в частности, что катающий радиус может находиться за пределами ручья, образующего калибр.

Исследования проводились для условий прокатки в вытяжных калибрах с рассогласованием скоростей переднего, заднего, одновременно переднего и заднего концов полосы. Диапазон изменения рассогласования скоростей составлял 2,5...10 % по отношению к прокатке полосы без натяжения. Была рассмотрена, в частности, система калибров овал-квадрат, по причине своей распространенности она представляет первоочередной интерес. Названная система в исследованиях была представлена парой калибров квадрат-овал, то есть, случаем прокатки квадратного раската в овальном калибре.

Моделирование проводилось для условий: скорость вращения валков – 32 об/мин, размеры исходной заготовки – квадрат со стороной 20 мм, диаметр по дну калибра –

172,9 мм, калибр – однорадиусный овал радиусом 90 мм, деформируемый материал – свинец. При этих же параметрах проводились и экспериментальные исследования на лабораторном стане, целью которых была проверка полученных расчетных зависимостей. Этим был и обусловлен выбор параметров исследований.

Исследования проводились в диапазоне вытяжек $\lambda = 1,121 \dots 1,459$. Результаты исследований представлены графическими зависимостями, показанными на рис. 2.

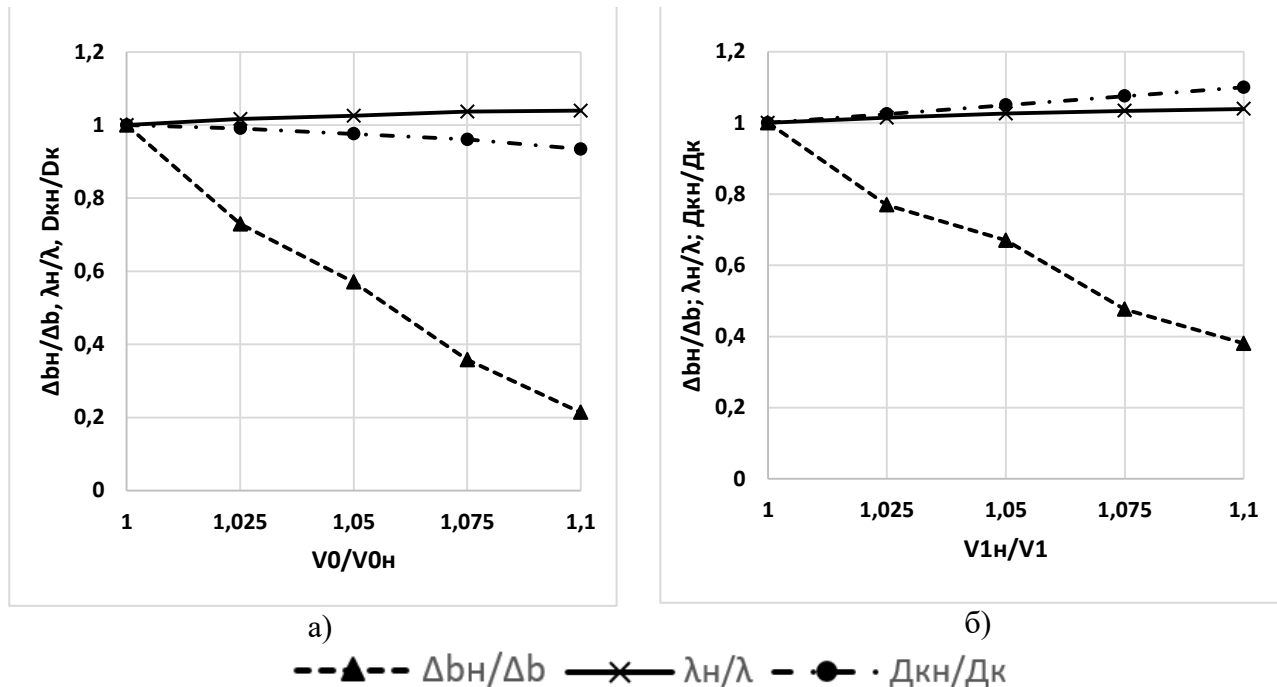


Рис. 2. Изменение параметров прокатки при прокатке с задним (а), передним (б), натяжениями по схеме «квадрат-овал»; $\lambda_0=1,121$. Индекс «н» означает прокатку с натяжением; индексы «0» и «1» означают заднее и переднее натяжения, соответственно.

Установлено, что при малых значениях коэффициента вытяжки и значительном расогласовании скоростей в условиях одновременного действия переднего и заднего натяжения в исследованных системах калибров может происходить утяжка профиля (возникает отрицательное уширение). С увеличением степени натяжения происходит увеличение катающего диаметра и коэффициента вытяжки, уширение уменьшается.

Выполнены экспериментальные исследования, целью которых была проверка адекватности разработанных моделей и подтверждение выдвинутых предположений. Сравнение результатов моделирования и экспериментальных данных подтвердило возможность использования программы FORGE 3D для исследования деформационно-скоростных условий прокатки в сортовых калибрах простой формы, по меньшей мере, для исследованного диапазона параметров.

ВЫВОДЫ

Выполнен анализ методов расчета катающего диаметра валков, основанных на геометрических соотношениях. Результаты анализа свидетельствуют о том, что все методы в недостаточной степени отражают физическую сторону взаимодействия полосы и валков, не учитывают кинематику перемещения металла и инструмента. Известные методы расчета скоростных режимов прокатки на основе катающего диаметра включают необходимость определения опережения, которое является трудноопределимым параметром, с недостаточно выясненной природой образования даже при прокатке на гладкой бочке.

Предложен метод определения катающего диаметра, в основе которого использована кинематическая взаимосвязь валков и выходящего из них раската. Метод исключает необходимость определения опережения при прокатке в вытяжных калибрах при расчете скоростных параметров.

Сравнение экспериментальных данных и результатов математического моделирования подтвердило возможность дальнейших исследований катающего диаметра по предлагаемой методике с использованием программы Forge 3D.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Выдрин В. Н. Процесс непрерывной прокатки / В. Н. Выдрин, А. С. Федосиенко, В. И. Крайнов. – М.: Металлургия, 1970. – 456 с.
2. Чекмарев А. П. Некоторые закономерности кинематики очага деформации при непрерывной прокатке с уширением / А. П. Чекмарев, И. Онищенко // *Обработка металлов давлением: сборник научных трудов ДМетИ.* – М.: Металлургия, 1967. – № 52. – С. 15–27.
3. Онищенко И. И. Теория непрерывной прокатки / И. И. Онищенко, П. И. Куценко, А. И. Куценко. – Запорожье: Изд-во ЗГИА, 1998 – 470 с.
4. Непрерывная прокатка / Коллективная монография под редакцией д. т. н., проф. В.Н. Данченко. – Днепропетровск: РВА «Дніпро-ВАЛ», 2002. – 588 с. – ISBN 966-7616-40-1.
5. Предельные значения динамического и кинематического натяжения при непрерывной прокатке / А. П. Чекмарев, В. И. Прокофьев, А. А. Динник [и др.] // *Обработка металлов давлением: сборник научных трудов ДМетИ.* – М.: Металлургия, 1970. – № 55. – С. 7–14.
6. Исследование процесса бесконечной прокатки с большими натяжениями / А. П. Чекмарев, А. Н. Чернышев, А. С. Кошевой [и др.] // *Обработка металлов давлением: сборник научных трудов ДМетИ.* – М.: Металлургия, 1971. – № 56. – С. 5–24.
7. Чекмарев А. П. Исследование установившихся процессов прокатки на непрерывном мелкосортном стане с целью определения управляющих воздействий / А. П. Чекмарев, А. Н. Силич, В. В. Кирсанов // *Обработка металлов давлением: сборник научных трудов ДМетИ.* – М.: Металлургия, 1971. – № 56. – С. 25–36.
8. Чекмарев А. П. Межклетевое натяжение при непрерывной прокатке / А. П. Чекмарев, И. А. Чекмарев, А. Я. Семенюта // *Обработка металлов давлением : сборник научных трудов ДМетИ.* – М.: Металлургия, 1970. – № 55. – С. 5–7.
9. Комплексное исследование процесса непрерывной прокатки / А. П. Чекмарев, И. И. Онищенко, В. В. Гетманец, М. П. Топоровский // *Обработка металлов давлением: сборник научных трудов ДМетИ.* – М.: Металлургия, 1965. – № 49. – С. 41–73.
10. Левченко Л. Н. Влияние натяжения на уширение при прокатке / Л. Н. Левченко, Л. Ф. Машкин // *Обработка металлов давлением: сборник научных трудов ДМетИ.* – М.: Металлургия, 1962. – № 48. – С. 158–167.
11. Чекмарев А. П. Исследование натяжения на непрерывном сортовом стане / А. П. Чекмарев, Г. П. Борисенко // *Обработка металлов давлением: сборник научных трудов ДМетИ.* – М.: Металлургия, 1962. – № 48. – С. 108–120.
12. Чекмарев А. П. Деформация полосы в межклетевом пространстве при непрерывной прокатке с натяжением / А. П. Чекмарев, И. И. Онищенко // *Обработка металлов давлением: сборник научных трудов ДМетИ.* – М.: Металлургия, 1965. – № 49. – С. 24–40.
13. Динник А. А. Исследование межклетевой деформации полосы на непрерывном проволочном стане / А. А. Динник, Л. Б. Черногоров, А. Н. Комаров // *Обработка металлов давлением: сборник научных трудов ДМетИ.* – М.: Металлургия, 1965. – № 49. – С. 104–110.
14. К вопросу определения межклетевых деформаций при горячей прокатке на непрерывных станах / В. И. Тарновский, А. А. Поздеев, В. И. Еремеев, А. Г. Криволапов // *Сборник научных трудов: Челябинский политехнический институт.* – Челябинск, 1968. – № 54. – С. 29–39.
15. Виноградов А. П. Калибровка прокатных валков / А. П. Виноградов, Г. А. Виноградов. – М.: Металлургия, 1950. – 344 с.
16. Чекмарев А. П. Катающий радиус в квадратном и овальном калибрах проволочного стана / А. П. Чекмарев, А. П. Лохматов // *Обработка металлов давлением: сборник научных трудов ДМетИ.* – М.: Металлургия, 1971. – № 57. – С. 91–99.
17. Диомидов Б. Б. Калибровка валков сортовых станков / Диомидов Б. Б., Литовченко Н. В. – М.: Металлургия, 1970. – 312 с.
18. Чекмарев А. П. Калибровка прокатных валков / А. П. Чекмарев, М. С. Мутьев, Р. А. Машиковцев. – М.: Металлургия, 1971. – 509 с.
19. Машкин Л. Ф. Определение катающего диаметра при прокатке в калибрах / Л. Ф. Машкин // *Теория и практика металлургии.* – 1997. – № 3. – С. 7–8.
20. Прокатка и калибровка: справочник в 6 т. (серия «Основы теории калибровки. Калибровка блюмов и заготовки, кругов и шестигранников, квадратной стали, проволоки и арматуры») / Сост. Илюкович Б.М., Нехаев Н.Е., Меркурьев С.Е.; ред. Илюкович Б.М. – Днепропетровск: РВА «Дніпро-ВАЛ», 2002. – Т. 1. – 506 с.
21. Огинский И. К. О механизме опережения при прокатке / Огинский И. К. // *Теория и практика металлургии.* – 2010. – № 5–6. – С. 113–117.
22. Опережение при прокатке в калибрах / И. К. Огинский, О. А. Ремез, А. А. Самсоненко, В. В. Бояркин // *Обработка материалов давлением: сборник научных трудов.* – Краматорск : ДГМА, 2014. – № 2(39). – С. 159–164.
23. Определение катающего диаметра валков при прокатке в вытяжных калибрах / В.Н. Данченко, О.А. Ремез, Себастиан Мроз, И.К. Огинский, А.А. Самсоненко // *Обработка материалов давлением : сборник научных трудов.* – Краматорск, 2011 – №1 (26) – С. 52–57.
24. Thilo Spittel. *Ferrous Alloys. V. 2 / Thilo Spittel, Marlene Spittel – New York: Springer, 2009. – P. 800.*
25. *Users Guide, How to run Forge 3d, Transvalor S.A. – Sophi Antipolis, 2003.*

REFERENCES

1. Vydrin V. N. *Process nepreryvnoj prokatki* / V. N. Vydrin, A. S. Fedosienko, V. I. Krajnov. – M.: Metallurgija, 1970. – 456 s.
2. Chekmarev A. P. *Nekotorye zakonovernosti kinematiki ochaga deformacii pri nepreryvnoj prokatke s ushireniem* / A. P. Chekmarev, I. Onishhenko // *Obrabotka metallov davleniem: sbornik nauchnyh trudov DMetI.* – M.: Metallurgija, 1967. – № 52. – S. 15–27.
3. Onishhenko I. I. *Teorija nepreryvnoj prokatki* / I. I. Onishhenko, P. I. Kucenko, A. I. Kucenko. – Zaporozh'e: Izd-vo ZGIA, 1998 – 470 s.
4. *Nepreryvnaja prokatka / Kollektivnaja monografija pod redakciej d. t. n., prof. V.N. Danchenko.* – Dnipropetrovs'k: RVA «Dnipro-VAL», 2002. – 588 s. – ISBN 966-7616-40-1.
5. *Predel'nye znachenija dinamicheskogo i kinematičeskogo natjazhenija pri nepreryvnoj prokatke* / A. P. Chekmarev, V. I. Prokofev, A. A. Dinnik [i dr.] // *Obrabotka metallov davleniem: sbornik nauchnyh trudov DMetI.* – M.: Metallurgija, 1970. – № 55. – S. 7–14.
6. *Issledovanie processa beskonečnoj prokatki s bol'shimi natjazhenijami* / A. P. Chekmarev, A. N. Chernyshev, A. S. Koshevoj [i dr.] // *Obrabotka metallov davleniem: sbornik nauchnyh trudov DMetI.* – M.: Metallurgija, 1971. – № 56. – S. 5–24.
7. *Chekmarev A. P. Issledovanie ustanovivshijsja processov prokatki na nepreryvnom melkosortnom stane s cel'ju opredelenija upravljajushhij vozdejsvij* / A. P. Chekmarev, A. N. Silich, V. V. Kirsanov // *Obrabotka metallov davleniem: sbornik nauchnyh trudov DMetI.* – M.: Metallurgija, 1971. – № 56. – S. 25–36.
8. *Chekmarev A. P. Mezhkletevoe natjazhenie pri nepreryvnoj prokatke* / A. P. Chekmarev, I. A. Chekmarev, A. Ja. Semenjuta // *Obrabotka metallov davleniem: sbornik nauchnyh trudov DMetI.* – M.: Metallurgija, 1970. – № 55. – S. 5–7.
9. *Kompleksnoe issledovanie processa nepreryvnoj prokatki* / A. P. Chekmarev, I. I. Onishhenko, V. V. Getmanec, M. P. Toporovskij // *Obrabotka metallov davleniem: sbornik nauchnyh trudov DMetI.* – M.: Metallurgija, 1965. – № 49. – S. 41–73.
10. *Levchenko L. N. Vlijanie natjazhenija na ushirenie pri prokatke* / L. N. Levchenko, L. F. Mashkin // *Obrabotka metallov davleniem: sbornik nauchnyh trudov DMetI.* – M.: Metallurgija, 1962. – № 48. – S. 158–167.
11. *Chekmarev A. P. Issledovanie natjazhenija na nepreryvnom sortovom stane* / A. P. Chekmarev, G. P. Borisenko // *Obrabotka metallov davleniem: sbornik nauchnyh trudov DMetI.* – M.: Metallurgija, 1962. – № 48. – S. 108–120.
12. *Chekmarev A. P. Deformacija polosity v mezhkletevom prostranstve pri nepreryvnoj prokatke s natjazheniem* / A. P. Chekmarev, I. I. Onishhenko // *Obrabotka metallov davleniem: sbornik nauchnyh trudov DMetI.* – M.: Metallurgija, 1965. – № 49. – S. 24–40.
13. *Dinnik A. A. Issledovanie mezhkletevoj deformacii polosity na nepreryvnom provolochnom stane* / A. A. Dinnik, L. B. Chernogorov, A. N. Komarov // *Obrabotka metallov davleniem: sbornik nauchnyh trudov DMetI.* – M.: Metallurgija, 1965. – № 49. – S. 104–110.
14. *K voprosu opredelenija mezhkletevyh deformacij pri gorjachej prokatke na nepreryvnyh stanah* / V. I. Tarnovskij, A. A. Pozdeev, V. I. Eremeev, A. G. Krivolapov // *Sbornik nauchnyh trudov: Cheljabinskij politehnicheskij institut.* – Cheljabinsk, 1968. – № 54. – S. 29–39.
15. *Vinogradov A. P. Kalibrovka prokatnyh valkov* / A. P. Vinogradov, G. A. Vinogradov. – M.: Metallurgizdat, 1950. – 344 s.
16. *Chekmarev A. P. Katajushhij radius v kvadratnom i oval'nom kalibrah provolochnogo stana* / A. P. Chekmarev, A. P. Lohmatov // *Obrabotka metallov davleniem: sbornik nauchnyh trudov DMetI.* – M.: Metallurgija, 1971. – № 57. – S. 91–99.
17. *Diomidov B. B. Kalibrovka valkov sortovyh stanov* / Diomidov B. B., Litovchenko N. V. – M.: Metallurgija, 1970. – 312 s.
18. *Chekmarev A. P. Kalibrovka prokatnyh valkov* / A. P. Chekmarev, M. S. Mut'ev, R. A. Mashkovcev. – M.: Metallurgija, 1971. – 509 s.
19. *Mashkin L. F. Opredelenie katajushhego diametra pri prokatke v kalibrah* / L. F. Mashkin // *Teorija i praktika metallurgii.* – 1997. – № 3. – S. 7–8.
20. *Prokatka i kalibrovka: spravochnik v 6 t. (serija «Osnovy teorii kalibrovki. Kalibrovka bljumov i zagotovki, krugov i shestigrannikov, kvadratnoj stali, provoloki i armatury»)* / Sost. Iljukovich B.M., Nehaev N.E., Merkur'ev S.E.; red. Iljukovich B.M. – Dnepropetrovsk: RVA «Dnipro-VAL», 2002. – T. 1. – 506 s.
21. *Oginskij I. K. O mehanizme operezhenija pri prokatke* / Oginskij I. K. // *Teorija i praktika metallurgii.* – 2010. – № 5–6. – S. 113–117.
22. *Operezhenie pri prokatke v kalibrah* / I. K. Oginskij, O. A. Remez, A. A. Samsonenko, V. V. Bojarkin // *Obrabotka materialov davleniem: sbornik nauchnyh trudov.* – Kramatorsk: DGMA, 2014. – № 2(39). – S. 159–164.
23. *Opredelenie katajushhego diametra valkov pri prokatke v vytjaznyh kalibrah* / V.N. Danchenko, O.A. Remez, Sebastian Mroz, I.K. Oginskij, A.A. Samsonenko // *Obrabotka materialov davleniem: sbornik nauchnyh trudov.* – Kramatorsk, 2011 – №1 (26) – S. 52–57.
24. *Thilo Spittel. Ferrous Alloys. V. 2 / Thilo Spittel, Marlene Spittel – New York: Springer, 2009. – P. 800.*
25. *Users Guide, How to run Forge 3d, Transvalor S.A. – Sophi Antipolis, 2003.*

Огинский И. К. – д-р техн. наук, ст. научн. сотр. каф. ОМД НМетАУ

Ремез О. А. – канд. техн. наук, доц. каф. ОМД НМетАУ

НМетАУ – Национальная металлургическая Академия Украины, г.Днепр.

E-mail: oginsky@gmail.com, remez1985@gmail.com

Статья поступила в редакцию 31.01.2017 г.