

УДК 621.771.26.001

Медведев В. С.
Боровик П. В.
Шпаков В. А.
Базарова Е. В.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛА В ЗАКРЫТЫХ БАЛОЧНЫХ КАЛИБРАХ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Разработка и внедрение новых технологий и высокоэффективного оборудования для производства двутавровых профилей возможны только при условии непрерывного совершенствования теории обработки металлов давлением, методов проектирования технологических процессов и калибровок валков [1].

Прокатка двутавровых балок представляет собой случай сложной деформации, протекающей с неравномерными обжатиями, в сложных скоростных и силовых условиях. Получение в этих условиях готового продукта точной формы и с надлежащими механическими свойствами зависит от правильного расчета режима обжатий и умелого конструирования системы калибровок.

Современные способы прокатки и калибровок двутавровых балок предусматривают формирование готового профиля в системе черновых двухвалковых балочных калибров и чистовых четырехвалковых универсальных калибров [2, 3].

Для создания научно обоснованных методов расчета калибровок валков и технологических процессов прокатки двутавровых балок необходимо иметь надежные математические модели определения интегральных характеристик формоизменения (уширения, утяжки и др.) и энергосиловых параметров прокатки (усилий, моментов и мощности прокатки).

При современном уровне развития компьютерной техники математическое моделирование процессов прокатки в фасонных калибрах должно основываться на результатах всестороннего теоретического анализа напряженно-деформированного состояния металла в очаге деформации. Зная распределение нормальных и касательных напряжений в очаге деформации и на поверхности контакта металла с валками, можно определить деформирующие усилия и деформации. В теории ОМД известно несколько аналитических методов исследования напряженно-деформированного состояния металла. В последние годы в теоретических исследованиях процессов прокатки, решении задач пластичности широко используются вариационные методы. Наибольшее распространение получили метод, основанный на построении в очаге деформации кинематически возможного поля скоростей перемещений [4, 5] и метод конечных элементов [6–10].

Целью работы является теоретическое исследование течения металла в закрытом балочном калибре методом конечных элементов, определение напряженно-деформированного состояния металла в очаге деформации, сравнение результатов теоретических исследований с экспериментальными данными и выдача рекомендаций по практическому применению метода конечных элементов для проектирования калибровок валков и технологии прокатки двутавровых профилей.

Вариационное исчисление является разделом математики, в котором изучаются вариации функционалов. При анализе процессов обработки давлением задача вариационного исчисления заключается в поиске функций, на которых функционал формоизменения достигает минимального значения. В настоящее время вариационные методы являются стандартными при решении определяющих уравнений для определения искомых параметров [11].

Вариационная формулировка может интерпретироваться как уравнение виртуальной работы:

$$\delta W_{in} = \delta W_{ext},$$

где δW_{in} – внутренняя виртуальная работа;

δW_{ext} – внешняя виртуальная работа.

При рассмотрении задачи пластического формоизменения поверхность деформируемого тела (рис. 1) по характеру граничных условий можно разделить на три части [12]:

S_c – площадь контактной поверхности;

S_T – площадь поверхности с приложенной начальной нагрузкой;

S_v – площадь поверхности с начальной скоростью.

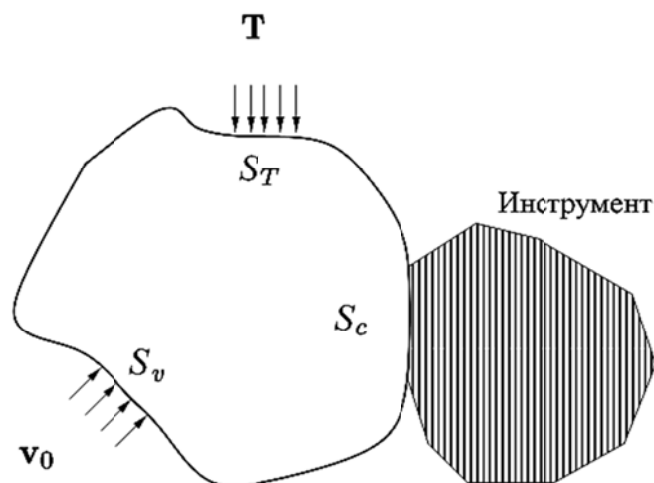


Рис. 1. Граничные условия

В общем случае вариационная формулировка задачи пластичности выделенного объема с учетом условия непроникновения инструмента в материал можно описать уравнением [12]

$$\int_V (\delta v \bar{\nabla}) : \sigma \sigma dV = \int_{S_c} \delta v \cdot \tau_T dS + \int_{S_c} \delta v \cdot n \sigma_n dS + \int_{S_T} \delta v \cdot T dS, \quad \forall \delta v \in v_c(t)$$

и

$$\int_{S_c} \delta \lambda h(v) dS \leq 0 \quad \forall \delta \lambda.$$

где δv – кинематически допустимая виртуальная скорость;

σ – тензор напряжений;

dV – элементарный объем;

V – деформируемый объем;

τ_T – касательные напряжения на поверхности контакта;

dS – элемент площади поверхности;

n – нормаль к поверхности dS ;

σ_n – множитель Лагранжа;

T – вектор начальной нагрузки на поверхности;

$h(v)$ – функция, описывающая условие взаимного непроникновения материалов инструмента и заготовки;

$\delta \lambda$ – весовая функция;

При этом $\delta v_c(t)$ характеризуется как набор функций, удовлетворяющих равенствам:

$$\begin{cases} \delta v = 0 & \text{на } S_v(t); \\ \delta v \cdot n = 0 & \text{на } S_c(t). \end{cases}$$

Для решения задачи пластического формоизменения металла использовали метод конечных элементов на базе программного комплекса ABAQUS [13].

В результате была разработана конечно-элементная математическая модель, описывающая трехмерную задачу прокатки в закрытом балочном калибре, учитывающая термодинамические эффекты при деформации материала.

Модель (рис. 2) состоит из абсолютно жестких недеформируемых тел верхнего и нижнего валков и проводки, а также деформируемого бруса, моделирующего прокатываемую заготовку. При этом в начальный момент времени заготовке задается скорость движения вдоль оси Z, а валки вращаются с заданной угловой скоростью, относительно осей перпендикулярных плоскости YZ.

Деформируемый брус (заготовка) представляет собой сетку из изопараметрических восьмиугольных билинейных элементов с редуцированной схемой интегрирования, имеющих свойства сплошной деформируемой среды в условиях трехмерной деформации и позволяющих решать совместную деформационно-температурную задачу.

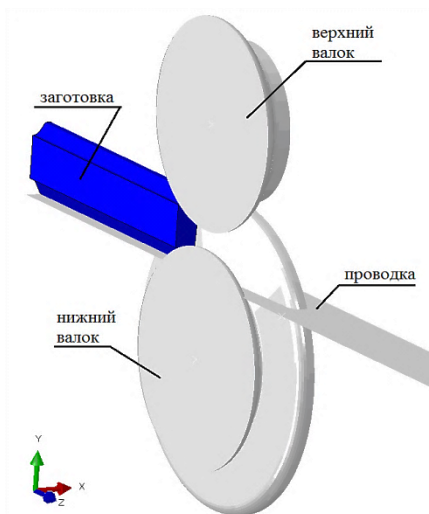


Рис. 2. Общий вид модели

В основу модели контактного взаимодействия был положен закон трения Амонтона – Кулона, как отношение напряжения трения (касательного) к внешнему контактному давлению между контактирующими телами.

На левую боковую поверхность заготовки накладывалось ограничение, которое описывает данную поверхность как плоскость симметрии.

Размеры заготовки – толщина и ширина стенки $d = 65,2$ мм и $b_k = 56,8$ мм; открытый фланец $h_o = 16,3$ мм, $a_o = 10,2$ мм, $b_o = 23,9$ мм; закрытый фланец $h_z = 21,1$ мм, $a_z = 12,1$ мм, $b_z = 24,1$ мм; высота $H = 102,6$ мм. Начальная конфигурация заготовки с разбиением конечно-элементной сетки приведена на рис. 3, а. Размеры закрытого балочного калибра (рис. 3, б) – толщина и ширина стенки $d = 27,5$ мм и $b_k = 65$ мм; открытый фланец $h_o = 30,75$ мм, $a_o = 9$ мм, $b_o = 21$ мм; закрытый фланец $h_z = 30,75$ мм, $a_z = 9,75$ мм, $b_z = 22,5$ мм; высота $H = 89$ мм. Начальный диаметр валков 340 мм (калибровка валков приведена в работе [14]).

Температура заготовки 1100 °С, скорость прокатки 1 м/с, угловая скорость валков $\omega = 5,9$ с⁻¹. Материал заготовки – сталь Ст3сп. Механические свойства стали определяли по методике Л. В. Андreyока [15].

В результате теоретического исследования напряженно-деформированного состояния металла в закрытом балочном калибре методом конечных элементов определены деформации и напряжения в продольном и поперечном сечениях очага деформации (рис. 4–6).

Напряженное состояние в профиле на выходе из валков изменяется следующим образом (рис. 4). Максимальное эквивалентное напряжение, полученное расчетом, располагается в шейке со стороны открытого гребня и принимает значение 84,3 МПа, а со стороны закрытого

ручья данная величина составляет 73,8 МПа. Наиболее низкие напряжения характерны для полки в области, прилегающей к боковым поверхностям закрытого валка, изменяются в пределах 10,5–42,2 МПа. При этом в открытом фланце эквивалентные напряжения больше в 4 раза по сравнению с закрытым. В середине шейки данная величина достигает 31,6 МПа.

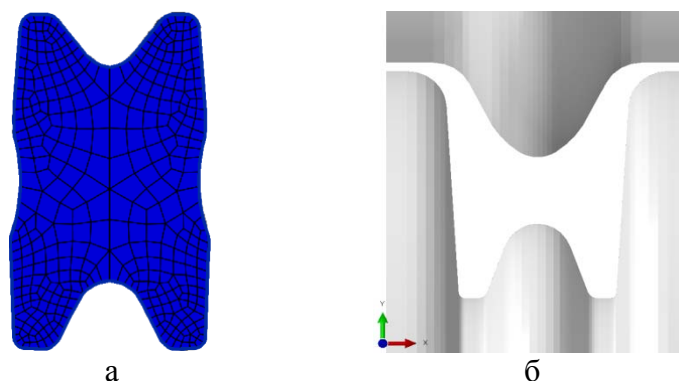


Рис. 3. Исходные данные моделирования:
 а – начальная конфигурация заготовки с разбиением конечно-элементной сетки,
 б – закрытый балочный калибр

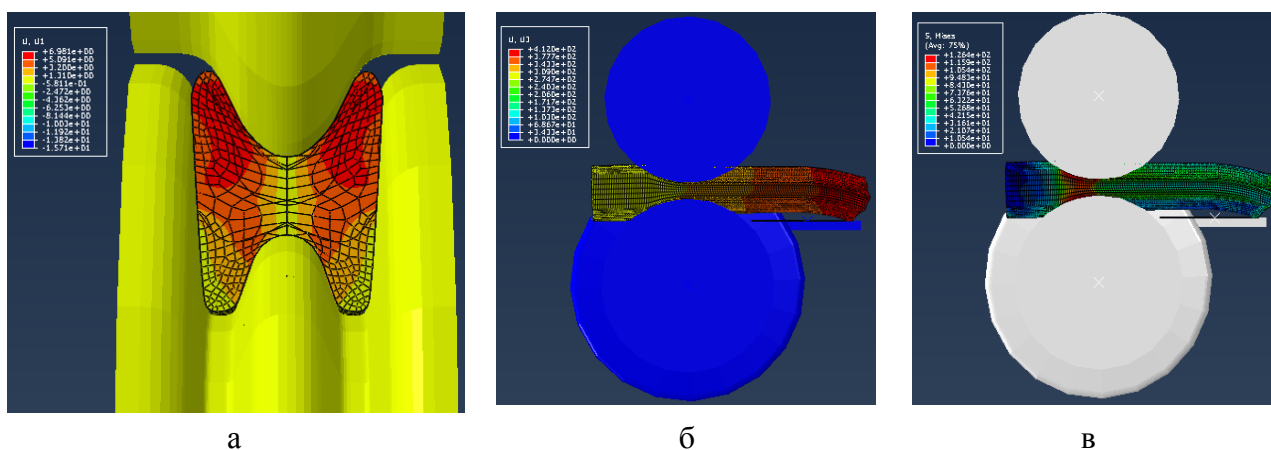


Рис. 4. Напряженно-деформированное состояние металла в закрытом балочном калибре:

а – эпюра распределения перемещений полосы в поперечном сечении U_1 , б – эпюра распределения перемещений полосы в продольном сечении U_3 , в – поле распределения эквивалентных напряжений по Мизесу (установив-шееся состояние) в продольном сечении полосы S

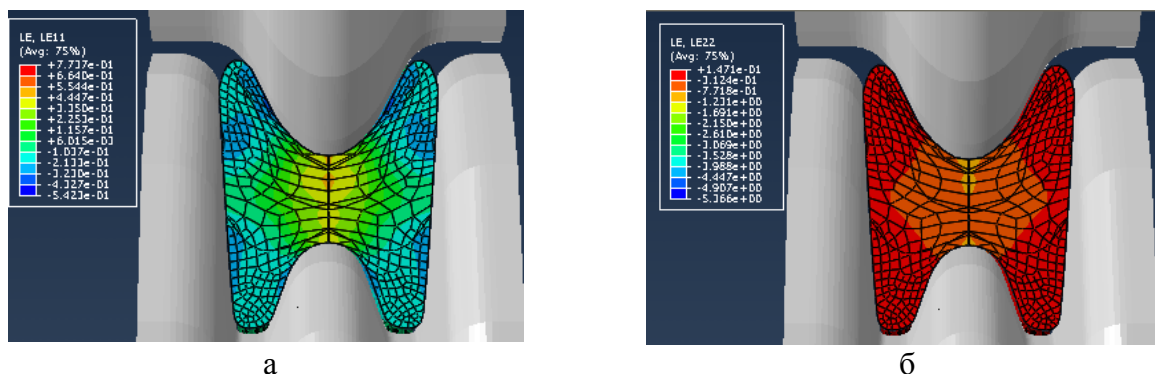


Рис. 5. Компоненты логарифмических деформаций металла в закрытом балочном калибре в поперечном сечении:
 а – вдоль оси X, LE11; б – вдоль оси Y, LE22

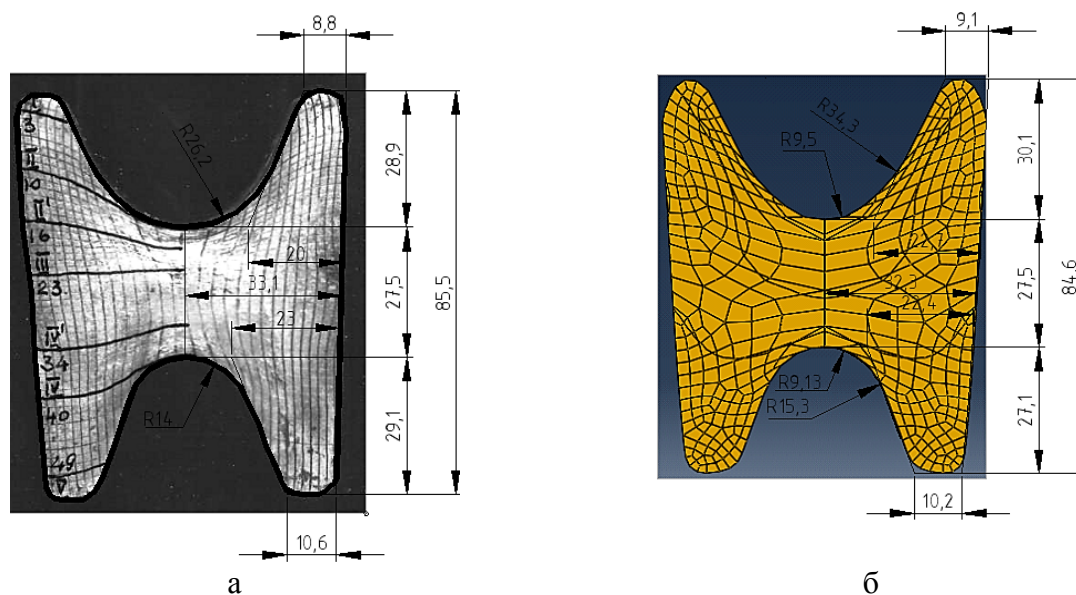


Рис. 6. Размеры поперечного сечения полосы после прокатки:
а – экспериментальный образец, б – теоретический расчет

В поперечном сечении профиля после прокатки распределение деформаций следующее (рис. 5). Логарифмическая деформация ϵ_1 изменяется от $-0,31$ до $-1,23$. При этом максимальное значение соответствует шейке, а минимальное – полке. По экспериментальным данным от $-0,18$ до $-0,95$ соответственно. Распределение по толщине шейки (оси симметрии) в эксперименте составило от $-0,95$ до $-0,6$. В результате расчета для тех же точек получено от $0,77$ до $-1,23$. Логарифмическая деформация ϵ_2 имеет разный знак и изменяется от $+0,55$ до $-0,54$. По экспериментальным данным от $+0,8$ до $-0,12$ соответственно. В шейке по оси симметрии профиля деформация изменяется от $+0,55$ до $+0,44$. Экспериментально получены значения от $+0,8$ до $+0,5$. Большее значение характерно для области касания металлом гребня верхнего вала. В полке профиля деформация изменяется от $-0,54$ до $+0,23$, а по экспериментальным данным от $-0,13$ до $+0,40$. Интенсивность деформаций сдвига Γ_k в рассматриваемом сечении изменяется от $0,18$ до $1,47$. В результате эксперимента данный параметр колебался в пределах $0,3$ – $1,7$. Максимальное значение по шейке профиля в области, прилегающей к гребню верхнего вала, по оси симметрии калибра составляет $1,47$. У нижнего (закрытого) гребня Γ_k принимает значение $1,28$, а по середине толщины шейки $0,92$. Аналогичная закономерность распределения интенсивности деформаций сдвига Γ_k достигнута и в эксперименте. В рассмотренных областях Γ_k соответственно принимает значения: $1,7$; $1,3$; $1,1$.

Установлены интегральные характеристики формоизменения: приращение высоты открытых и закрытых фланцев составило $13,8$ и $6,0$ мм соответственно, общая утяжка высоты профиля равна $18,0$ мм. Приращение высоты закрытых фланцев в 2 раза меньше, чем открытых. Такой характер течения металла в балочных калибрах установлен на практике и объясняется осаживающим действием закрытых ручьев калибров на металл. Этот факт подтвержден теоретически и в данном исследовании.

Адекватность разработанной теоретической модели реальным процессам прокатки подтверждена сравнением результатов теоретических расчетов с экспериментальными данными. В работе [14] были проведены экспериментальные исследования течения металла в закрытом балочном калибре следующим в линии прокатки двутавровой балки непосредственно за первым разрезным калибром. Для исследования в условиях моделирования реального процесса прокатки исходные свинцовые заготовки получали путем спайки сплавом Вуда отдельных частей длиной 170 мм, на торце которых была нанесена координатная сетка с базой 2 мм. Заготовку прокатывали на лабораторном стане 360 . После прокатки образцы

распаивали. По результатам измерения координат узлов сетки вычисляли наибольшие логарифмические деформации ϵ_1 и ϵ_2 по методу Э. Зибеля. На основе определенных параметров ϵ_1 и ϵ_2 была определена интенсивность деформаций сдвига Γ_k с учетом условия несжимаемости.

На рис. 6, а приведены размеры поперечного сечения экспериментального образца на выходе из очага деформации [14], а на рис. 6, б расчетные значения. Анализ характера распределений деформаций и интегральных характеристик формоизменения металла показывает, что погрешность в абсолютных значениях приращения высоты открытого и закрытого фланцев составила 9,5 и 25,0 % соответственно. Погрешность в утяжке общей высоты профиля составила 5,3 %. Физически разница в приращении высоты открытого фланца равна 1,2 мм, закрытого 2,0 мм, а общей высоты профиля 0,9 мм. Это вполне допустимо при проектировании калибровок валков для прокатки двутавровых балок.

Проведенные теоретические исследования позволили установить течение металла при прокатке двутавровых балок в черновых закрытых балочных калибрах, определить деформации и напряжения в продольных и поперечных сечениях деформируемой полосы, установить интегральные характеристики формоизменения – приращения высоты открытых и закрытых фланцев, общую утяжку высоты профиля. На основании проведенных исследований разработаны предложения по совершенствованию технологии прокатки и калибровок валков двутавровых балок № 14 на крупносортом стане 600 ПАО «АМК».

ВЫВОДЫ

В статье приведены теоретические исследования течения металла в закрытом балочном калибре методом конечных элементов, определено напряженно-деформированное состояние металла в очаге деформации, дано сравнение результатов теоретических исследований с экспериментальными данными и выданы рекомендации по практическому применению метода конечных элементов для проектирования калибровок валков и технологии прокатки двутавровых профилей. Метод конечных элементов на базе программного комплекса ABAQUS может быть использован для решения задач пластического формоизменения металла в балочных калибрах.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Медведев В. С. Системный подход к вопросу автоматизированного проектирования калибровок валков для прокатки сложных фасонных профилей / В. С. Медведев. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*, 2008. – № 3. – С. 41–46.
2. Илюкович Б. М. Прокатка и калибровка : справочник. – Днепропетровск : РВА «Дніпро-ВАЛ», 2004. – Т. 6. – 824 с.
3. Лиханский В. С. Технология производства фасонных профилей с применением кассет / В. С. Лиханский, В. Н. Гринавцев. – М. : *Металлургия*, 1986. – 232 с.
4. Вариационные принципы механики в теории обработки металлов давлением. / И. Я. Тарновский [и др.] – М. : *Металлургиздат*, 1963. – 54 с.
5. Тарновский И. Я. Элементы теории прокатки сложных профилей. / И. Я. Тарновский, А. Н. Скороходов, Б. М. Илюкович. – М. : *Металлургия*, 1972. – 352 с.
6. Илюкович Б. М. Теоретические основы обработки металлов давлением. / Б. М. Илюкович, В. С. Баакашвили, Р. В. Бединейшвили. – Тбилиси : *Сабчота Сакартвело*, 1979. – 663 с.
7. Гун Г. Я. Математическое моделирование процессов обработки металлов давлением. / Г. Я. Гун. – М. : *Металлургия*, 1983. – 352 с.
8. Копп Р. Моделирование и проектирование процессов прокатки при помощи метода конечных элементов. / Р. Копп, П. М. Домен. // *Черные металлы*, 1990. – № 7. – С. 62–68.
9. Ершов С. В. О моделировании процесса прокатки с использованием методов конечных элементов / С. В. Ершов. // *Металлы*, 2004. – № 4. – С. 36–41.
10. Миленин А. А. Математическое моделирование прокатки в калибрах в условиях трехмерного течения металла / А. А. Миленин, П. В. Корсун, С. В. Ершов // *Металлургическая и горнорудная промышленность*, 2000. – № 8–9. – С. 56–58.
11. Васидзу К. Вариационные методы в теории упругости и пластичности : пер. с англ. / К. Васидзу. – М. : *Мир*, 1987. – 542 с.
12. Stoker H. C. Title: *Developments of the Arbitrary Lagrangian-Eulerian Method in non-linear Solid Mechanics. Ph.D-Thesis / H. C. Stoker.* – Twente, The Netherlands, 1999.

13. Боровік П. В. Теоретичні дослідження процесів обробки металів тиском на основі методу скінчених елементів : навч. посіб. / П. В. Боровік. – Алчевськ : ДонДТУ, 2012. – 170 с.
14. Медведев В. С. Экспериментальное исследование течения металла в балочных калибрах / В. С. Медведев, В. А. Шпаков, Е. В. Базарова // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні : зб. наук. праць – Луганськ : вид-во СНУ ім. В. Даля. 2013. – № 1 (14). – С. 52–61.
15. Андреюк Л. В. Аналитические зависимости сопротивления деформации металла от температуры и степени деформации / Л. В. Андреюк, Г. Г. Тюленев // Сталь. – 1972. – № 9. – С. 545–547.

REFERENCES

1. Medvedev V. S. Sistemnyj podhod k voprosu avtomatizirovannogo proektirovanija kalibrovok val-kov dlja prokatki slozhnyh fasonnyh profilej / V. S. Medvedev. // Metallurgicheskaja i gornorudnaja promyshlennost', 2008. – № 3. – S. 41–46.
2. Iljukovich B. M. Prokatka i kalibrovka : spravocnik. – Dnepropetrovsk : RVA «Dnipro-VAL», 2004. – T. 6. – 824 s.
3. Lihanskij V. S. Tehnologija proizvodstva fasonnyh profilej s primeneniem kasset / V. S. Lihanskij, V. N. Grinavcev. – M. : Metallurgija, 1986. – 232 s.
4. Variacionnye principy mehaniki v teorii obrabotki metallov davleniem. / I. Ja. Tarnovskij [i dr.] – M. : Metallurgizdat, 1963. – 54 s.
5. Tarnovskij I. Ja. Jelementy teorii prokatki slozhnyh profilej. / I. Ja. Tarnovskij, A. N. Skorohodov, B. M. Iljukovich. – M. : Metallurgija, 1972. – 352 s.
6. Iljukovich B. M. Teoreticheskie osnovy obrabotki metallov davleniem. / B. M. Iljukovich, V. S. Baakashvili, R. V. Bedinejshvili. – Tbilisi : Sabchota Sakartvelo, 1979. – 663 s.
7. Gun G. Ja. Matematicheskoe modelirovanie processov obrabotki metallov davleniem. / G. Ja. Gun. – M. : Metallurgija, 1983. – 352 s.
8. Kopp R. Modelirovanie i proektirovanie processov prokatki pri pomoshhi metoda konechnykh jelementov. / R. Kopp, P. M. Domen. // Chernye metally, 1990. – № 7. – S. 62–68.
9. Ershov S. V. O modelirovanii processa prokatki s ispol'zovaniem metodov konechnykh jelementov / S. V. Ershov. // Metally, 2004. – № 4. – S. 36–41.
10. Milenin A. A. Matematicheskoe modelirovanie prokatki v kalibrah v uslovijah trehmernogo techenija metalla / A. A. Milenin, P. V. Korsun, S. V. Ershov // Metallurgicheskaja i gornorudnaja promyshlennost', 2000. – № 8–9. – S. 56–58.
11. Vasilidzu K. Variacionnye metody v teorii uprugosti i plastichnosti : per. s angl. / K. Vasilidzu. – M. : Mir, 1987. – 542 s.
12. Stoker H. C. Title: Developments of the Arbitrary Lagrangian-Eulerian Method in non-linear Solid Mechanics. Ph.D-Thesis / H. C. Stoker. – Twente, The Netherlands, 1999.
13. Borovik P. V. Teoretichni doslidzhennja procesiv obrobki metaliv tiskom na osnovi metodu skinchenih elementiv : navch. posib. / P. V. Borovik. – Alchevs'k : DonDTU, 2012. – 170 s.
14. Medvedev V. S. Jeksperimental'noe issledovanie techenija metalla v balochnykh kalibrah / V. S. Medvedev, V. A. Shpakov, E. V. Bazarova // Resursozberigajuchi tehnologii virobniictva ta obrobki tiskom materialiv u mashinobuduvanni : zb. nauk. pr. – Lugans'k : vid-vo SNU im. V. Dalja, 2013. – № 1(14). – S. 52-61.
15. Andrejuk L. V. Analiticheskie zavisimosti soprotivlenija deformacii metalla ot temperatury i stepeni deformacii / L. V. Andrejuk, G. G. Tjulenev // Stal'. – 1972. – № 9. – S. 545–547.

Медведев В.С.	– д-р техн. наук, гл. науч. сотр. ГП «УкрНТЦ «Энергосталь»
Боровик П.В.	– канд. техн. наук, доц. ДонГТУ
Шпаков В.А.	– канд. техн. наук, доц. ДонГТУ
Базарова Е.В.	– ассистент ДонГТУ

ГП «УкрНТЦ «Энергосталь» - государственное предприятие «УкрНТЦ «Энергосталь», г. Харьков.

ДонГТУ – Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск.

E-mail: niimet@energostal.org.ua, borovikpv@mail.ru, katy8007@i.ua