

УДК 621.771.26.001

**В. С. МЕДВЕДЕВ**, докт. техн. наук, ГП «УкрНТЦ «Энергосталь», Харьков;  
**Е. В. БАЗАРОВА**, ассистент, ДонГТУ;  
**В. А. ШПАКОВ**, канд. техн. наук, доц., ДонГТУ, Алчевск

## **ВЛИЯНИЕ ОБЖАТИЯ СТЕНКИ НА ИЗМЕНЕНИЕ ВЫСОТЫ ФЛАНЦЕВ В ЧЕРНОВЫХ ЗАКРЫТЫХ БАЛОЧНЫХ КАЛИБРАХ**

Приведены результаты математического моделирования течения металла в черновом закрытом балочном калибре методом конечных элементов. Показано распределение напряжений, перемещений и деформаций в поперечном сечении прокатываемого профиля. Установлено, что с повышением обжатия стенки общая высота полок уменьшается. Высота открытых и закрытых фланцев увеличивается. Интенсивность роста приращения высоты закрытых фланцев меньше, чем открытых. Для получения двутавровых профилей с высокими фланцами прокатку необходимо вести с интенсивной деформацией стенки в черновых калибрах.

**Ключевые слова:** балочный калибр, математическая модель, деформация металла, приращение фланцев.

**Введение.** При прокатке двутавровых профилей первые черновые проходы осуществляются в разрезных балочных калибрах (открытых и закрытых). В этих проходах формируются стенка (шейка) и фланцы (полки) профиля. В последующих балочных калибрах они постепенно обжимаются до конечных размеров готового профиля. Практикой доказано, что от правильного расчета и конструирования разрезных калибров в большой степени зависит нормальное выполнение конечного профиля. Одним из основных вопросов, который стоит при разработке калибровок валков, является определение высотной деформации (утяжки или приращения) открытых и закрытых фланцев, которая зависит от многих технологических факторов, в том числе и от величины обжатия стенки в разрезных балочных калибрах.

В работах Чекмарева А.П., Литовченко Н.В., Жадана В.Т. и др. [1–3], посвященных калибровке валков для прокатки двутавров, даны рекомендации по построению балочных калибров, определению параметров деформации металла (коэффициентов вытяжки, обжатия и уширения стенки, бокового обжатия фланцев и др.). Величинами приращения или утяжки высоты открытых и закрытых фланцев задаются приблизительно, исходя из практических данных.

Бахтинов Б.П. и Штернов М.М. [4] утяжку и приращение фланцев рассчитывают по инженерным формулам, учитывающим особенности скоростного режима прокатки в закрытых балочных калибрах.

Смирнов В.К., Шилов В.А. и Инатович Ю.В. [5] получили расчетные формулы для определения коэффициентов деформации фланцев по высоте в открытых и закрытых ручьях калибров путем обобщения накопленного опыта проектирования калибровок валков и статистического анализа действующих режимов прокатки двутавровых профилей.

Высокий технический уровень современных персональных компьютеров с их большим объемом памяти и быстродействием позволил исследователям широко использовать методы математического моделирования прокатки в калибрах с применением вариационных принципов механики сплошных сред. Это дает возможность адекватно описывать течение металла в фасонных калибрах и получать достаточно точные данные по параметрам формоизменения и энергетике процесса. В настоящее время в основном используют вариационный метод с построением кинематически возможного поля скоростей [6] и метод конечных элементов [7].

Настоящая статья является продолжением проведенных авторами теоретических исследований течения металла в балочном калибре методом конечных элементов [8]. В этой работе на базе программного комплекса ABAQUS [9] была разработана конечно-элементная математическая модель, описывающая трехмерную задачу прокатки в закрытом балочном калибре, учитывающая термодинамические эффекты при деформации материала.

**Целью** данного исследования является определение влияния обжатия стенки на изменение высоты фланцев в черновых закрытых балочных калибрах.

**Результаты исследований.** Влияние обжатия стенки на высотную деформацию фланцев исследовали на теоретической модели прокатки двутавровой заготовки с толщиной стенки 65,2 мм в закрытом балочном калибре (рис. 1) с толщиной стенки 47,5; 37,5 и 27,5 мм (толщину стенки изменяли путем опускания верхнего валка). Обжатие стенки составляло 17,7; 27,7 и 37,7 мм.

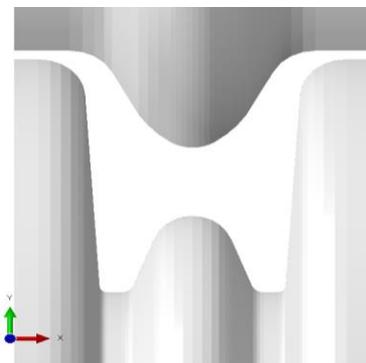


Рис. 1 – Черновой закрытый балочный калибр

Расчетные поперечные сечения полос, полученные путем математического моделирования прокатки двутавровой заготовки с варьированием обжатия стенки, приведены на рис. 2, а основные параметры формоизменения в табл. 1.

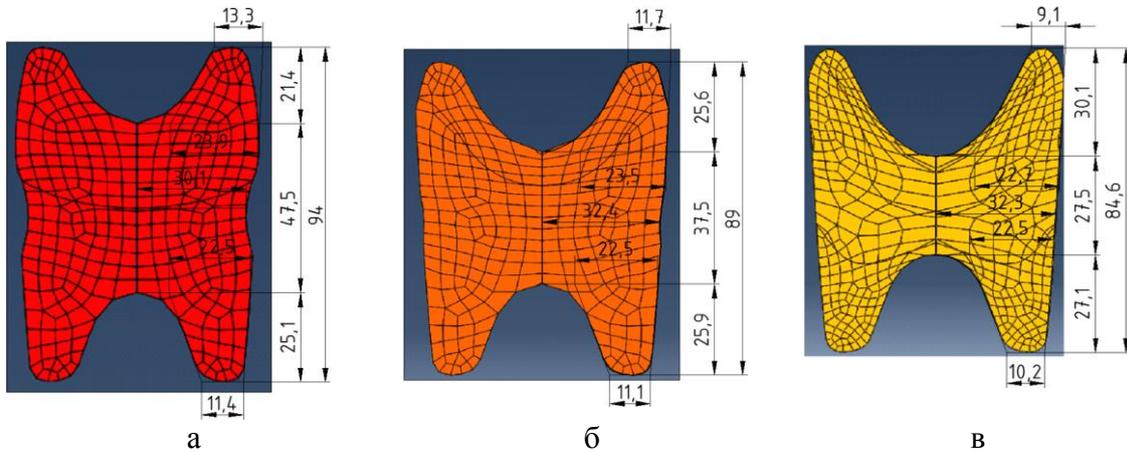


Рис. 2 – Размеры поперечного сечения полосы после прокатки: а – обжатие по стенке 17,7 мм (толщина стенки 47,5 мм); б – обжатие по стенке 27,7 мм (толщина стенки 37,5 мм); в – обжатие по стенке 37,7 мм (толщина стенки 27,5 мм)

Размеры заготовки – толщина и ширина стенки  $d = 65,2$  мм,  $b_k = 56,8$  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 заготовки  $H = 102,6$  мм.

Размеры закрытого балочного калибра при толщине стенки  $d = 27,5$  мм: ширина стенки  $b_k = 65$  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 калибра  $H = 89$  мм. Начальный диаметр валков 340 мм (калибровка валков приведена в работе [10]).

Таблица 1. Формоизменение металла при прокатке в черновом закрытом балочном калибре (в заготовке ширина стенки равна ее толщине  $B/d = 1$ )

№ образцов	Размеры поперечного сечения полосы после прокатки				Деформации							
					стенка		полка		открытый фланец		закрытый фланец	
	$d$ , мм	$H$ , мм	$h_o$ , мм	$h_z$ , мм	$\Delta d$ , мм	$\eta_d$	$\Delta H$ , мм	$\eta_H$	$\Delta h_o$ , мм	$\eta_{h_o}$	$\Delta h_z$ , мм	$\eta_{h_z}$
Загот.	65,2	102,6	16,3	21,1								
1	47,5	94,0	21,4	25,1	17,7	1,373	8,6	1,091	5,1	0,762	4,0	0,841
2	37,5	89,0	25,6	25,9	27,7	1,739	13,7	1,153	9,3	0,637	4,8	0,815
3	27,5	84,7	30,1	27,1	37,7	2,371	18,0	1,211	13,8	0,542	6,0	0,779

Здесь:  $d$  – толщина стенки,  $H$  – высота полки,  $h_o$  – высота открытого фланца,  $h_z$  – высота закрытого фланца.

Деформация металла характеризовалась следующими величинами:  $\Delta d = d - d'$  – обжатие стенки;  $\eta_d = d / d'$  – коэффициент обжатия стенки по толщине;  $\Delta H = H - H'$  – утяжка полки;  $\eta_H = H / H'$  – коэффициент высотной деформации полки;  $\Delta h_o = h'_o - h_o$  – абсолютное приращение высоты открытого фланца;  $\eta_{h_o} = h_o / h'_o$  – коэффициент высотной деформации открытого фланца;  $\Delta h_3 = h'_3 - h_3$  – абсолютное приращение высоты закрытого фланца;  $\eta_{h_3} = h_3 / h'_3$  – коэффициент высотной деформации закрытого фланца.

В результате проведенных исследований установлено, что в черновых закрытых балочных калибрах при увеличении деформации стенки  $\eta_d$  с 1,373 до 2,371 уменьшается общая высота полок  $H$ , а открытый и закрытый фланцы получают интенсивное приращение высоты (рис. 3). Утяжка полок  $\Delta H$  возрастает с 8,6 до 18,0 мм, т.е. в 2,1 раза, при этом коэффициент высотной деформации полок  $\eta_H$  увеличивается с 1,091 до 1,211 (рис. 3, а). Приращение высоты открытых фланцев  $\Delta h_o$  возрастает с 5,1 до 13,8 мм, т.е. в 2,71 раза, при этом коэффициент высотной деформации открытого фланца  $\eta_{h_o}$  уменьшается с 0,762 до 0,542 (рис. 3, б). Интенсивность роста приращения высоты закрытых фланцев меньше, чем открытых. Так,  $\Delta h_3$  возрастает с 4 до 6 мм, т.е. в 1,5 раза, а коэффициент  $\eta_{h_3}$  уменьшается с 0,841 до 0,779 (рис. 3, в).

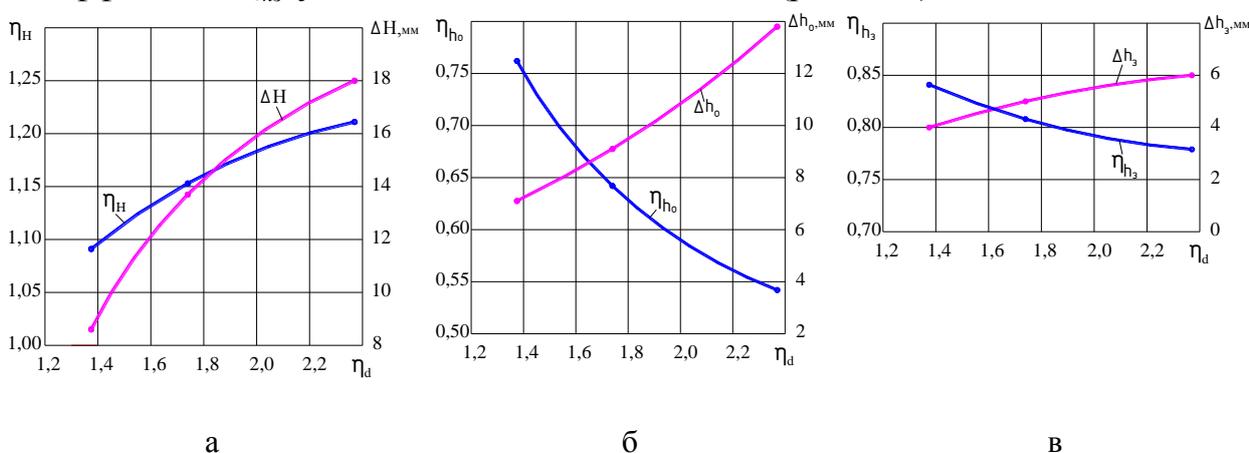


Рис. 3 – Влияние обжатия стенки на высотную деформацию фланцев в черновом закрытом балочном калибре: а – зависимость высотной деформации полок  $\eta_H$  и  $\Delta H$  от обжатия стенки  $\eta_d$ ; б – зависимость высотной деформации открытых фланцев  $\eta_{h_o}$  и  $\Delta h_o$  от обжатия стенки  $\eta_d$ ; в – зависимость высотной деформации закрытых фланцев  $\eta_{h_3}$  и  $\Delta h_3$  от обжатия стенки  $\eta_d$

При увеличении обжатия стенки существенно изменяется напряженно-деформированное состояние металла. Изменяются не только абсолютные значения деформаций и напряжений, но и характер их распределения в очаге деформации. На рис. 4–6 приведены поле распределения эквивалентных напряжений по Мизесу (установившееся состояние) в поперечном и

продольном сечении полосы  $S$  (позиции «а» и «б») и соответствующие эпюры перемещений  $U1$  и  $U3$  (позиции «в» и «г»).

Так, эквивалентные напряжения в стенке по мере увеличения ее обжатия с 17,7 до 37,7 мм возрастают с +26,2...+43,3 до +42,2...+73,8 МПа. При малом обжатии область максимальных напряжений локализуется в стенке со стороны разрезающего гребня открытого ручья валка. При максимальном обжатии эта область распространяется на все поперечное сечение стенки, захватывая и объемы металла, примыкающие к внутренним поверхностям открытых и закрытых фланцев. Область наиболее низких напряжений (до 10,3 МПа) располагается при малых обжатиях стенки на концах открытых и закрытых фланцев, а при больших обжатиях – в объемах металла, примыкающих к наружным (боковым) поверхностям фланцев и стенки. При этом в открытых фланцах напряжения в 4 раза больше, чем в закрытых. В середине стенки максимальные напряжения достигают 31,6 МПа.

Распределение перемещений по поперечному сечению профиля также зависит от величины обжатия стенки. Во всем диапазоне изменения обжатий стенки наибольшие перемещения наблюдаются в области оснований открытых фланцев и составляют +4,7...+7,0 мм (максимальное перемещение при  $\Delta d = 37,7$  м). На концах открытых фланцев перемещения находятся в пределах +2,9...+5,1 мм. В закрытых фланцах перемещения существенно ниже, чем в открытых. Наименьшие перемещения на концах закрытых фланцев –0,5 мм. Перемещения в стенке не превышают 5,1 мм.

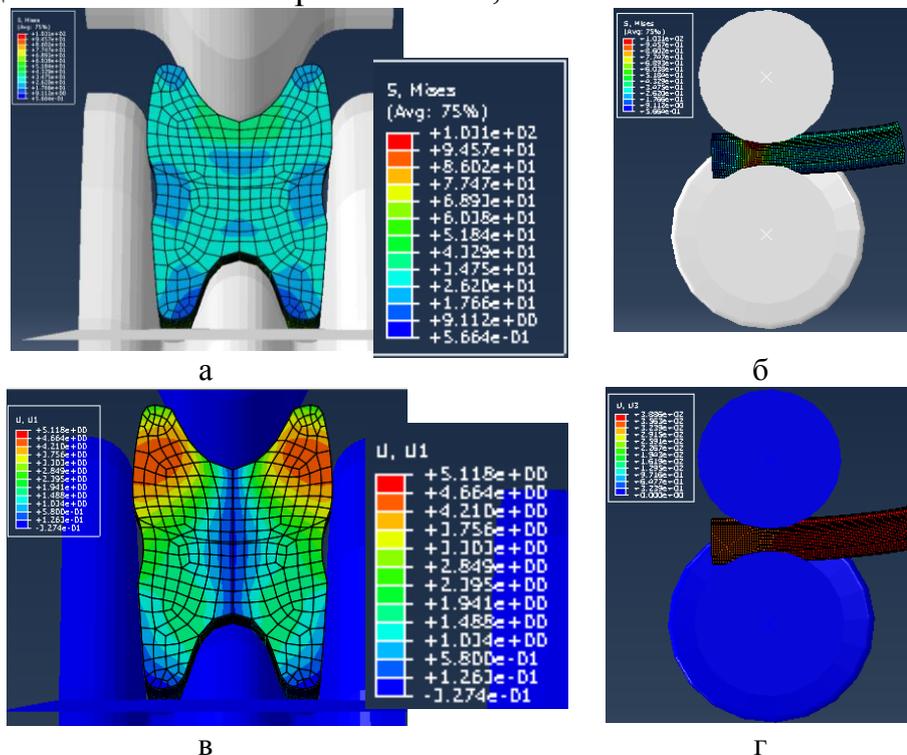


Рис. 4 – Напряженно-деформированное состояние металла в закрытом балочном калибре при абсолютном обжатии стенки  $\Delta d = 17,7$  мм

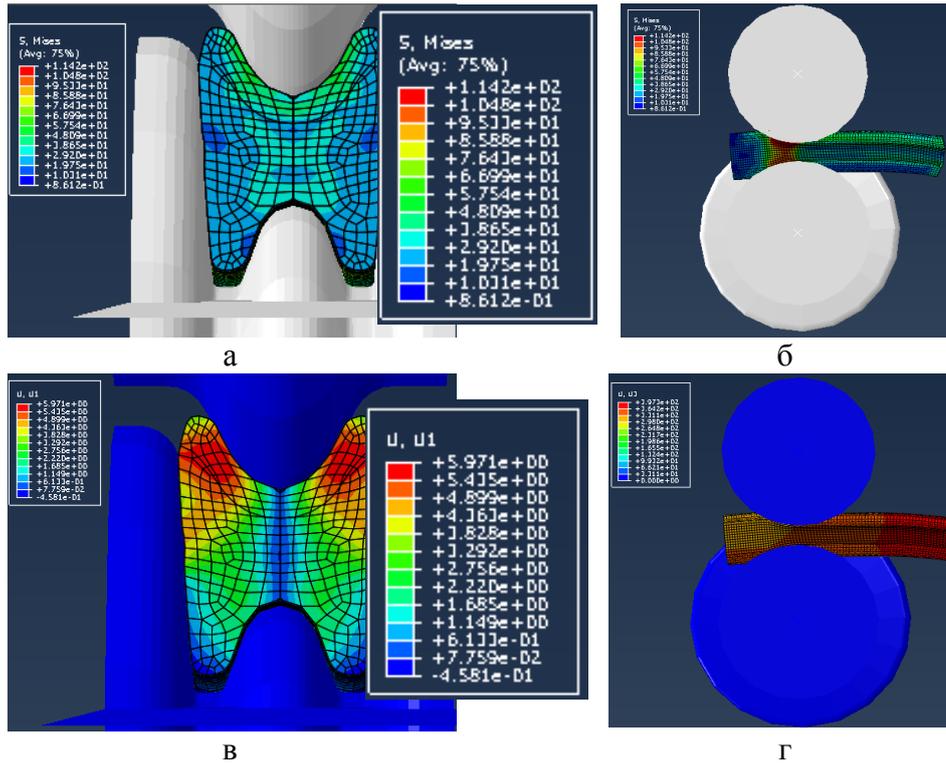


Рис. 5 – Напряженно-деформированное состояние металла в закрытом балочном калибре при абсолютном обжатии стенки  $\Delta d = 27,7$  мм

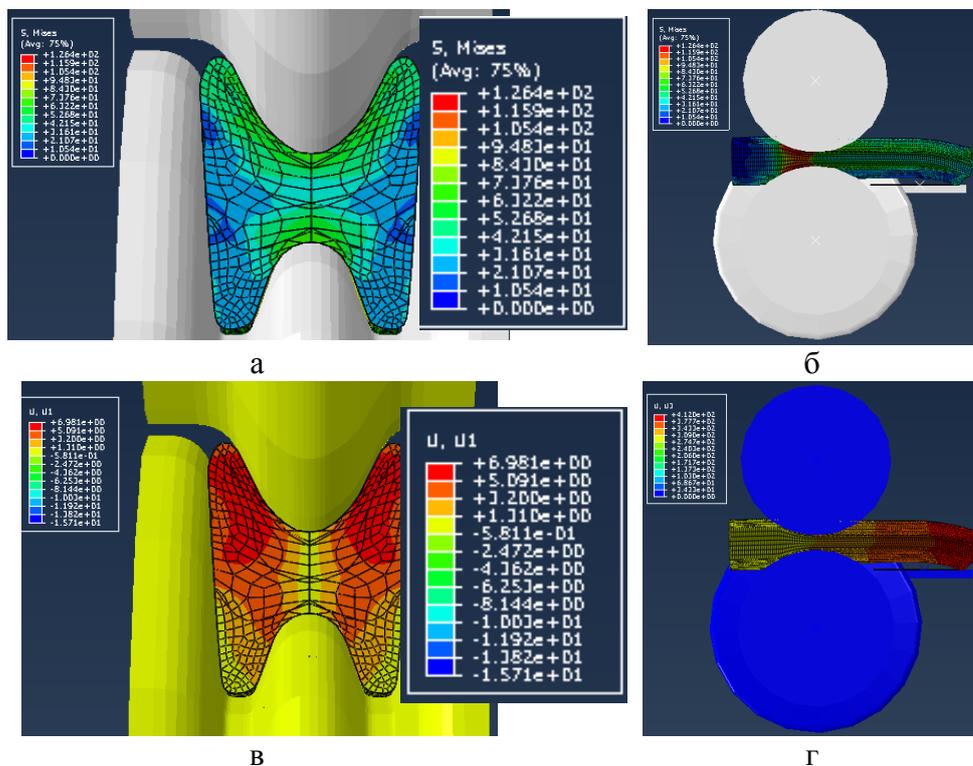


Рис. 6 – Напряженно-деформированное состояние металла в закрытом балочном калибре при абсолютном обжатии стенки  $\Delta d = 37,7$  мм

Распределение логарифмических деформаций в поперечном сечении профиля вдоль оси  $Y(e_1)$  и оси  $X(e_2)$  крайне неравномерно и зависит от величины обжатия стенки. При этом во всем диапазоне изменения обжатий стенки наблюдается качественно одинаковый характер распределения  $e_1$  и  $e_2$ .

Деформации  $e_1$  по высоте профиля на участках стенки, прилегающих к открытому и закрытому разрезающим гребням валков, больше, чем по середине стенки. Причем в направлении от поверхностей гребней к горизонтальной оси стенки  $e_1$  сначала несколько возрастают до своего максимального значения, а затем уменьшаются до минимума. На участках полок максимальные значения  $e_1$  относятся к концам открытых фланцев, а минимальные значения к концам закрытых. По ширине профиля деформации  $e_1$  плавно уменьшаются от оси калибра к полкам. Некоторое увеличение  $e_1$  имеет место у наружных граней полок, что связано с активным действием контактных сил трения.

Максимальное значение деформации  $e_2$  располагается на оси симметрии калибра. По ширине калибра  $e_2$  уменьшаются от середины к наружным граням полок. Минимальные значения деформации  $e_2$  наблюдаются на концах закрытых фланцев. По толщине стенки деформации  $e_2$  уменьшаются в направлении от гребней к ее горизонтальной оси.

Установленный методом конечных элементов характер распределения деформаций  $e_1$  и  $e_2$  подтверждается экспериментальными исследованиями течения металла в закрытом балочном калибре [10].

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 5,3 %. Максимальная 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.

Из анализа результатов теоретических исследований следует важный для практики вывод: для получения двутавровых профилей с высокими фланцами прокатку необходимо вести с интенсивной деформацией стенки в черновых калибрах. На основании проведенных исследований разработаны предложения по совершенствованию технологии прокатки и калибровок валков двутавровых балок № 14 на крупносортом стане 600 ПАО «АМК».

Выводы. В результате теоретического исследования течения металла в закрытом разрезном балочном калибре методом конечных элементов установлено, что с повышением обжатия стенки общая высота полок

уменьшается, а высота открытых и закрытых фланцев увеличивается. Приращение высоты открытых фланцев больше, чем закрытых. Для получения двутавровых профилей с высокими фланцами прокатку необходимо вести с интенсивным обжатием стенки в черновых калибрах. Адекватность разработанной теоретической модели реальным процессам прокатки подтверждена сравнением результатов теоретических расчетов с экспериментальными данными.

**Список литературы:** 1. Жадан В.Т. Производство двутавровых балок / В.Т. Жадан, Г.Д. Фейгин, И.М. Герман. – М. : Metallurgija, 1972. – 192 с. 2. Литовченко Н.В. Калибровка профилей и прокатных валков / Н.В. Литовченко. – М. : Metallurgija, 1990. – 432 с. 3. Чекмарев А.П. Калибровка прокатных валков / А.П. Чекмарев, М.С. Мутьев, Р.А. Машиковцев. – М. : Metallurgija, 1971. – 521 с. 4. Бахтинов Б.П. Калибровка прокатных валков / Б.П. Бахтинов, М.М. Штернов. – М.: Metallurgizdat, 1953. – 783 с. 5. Смирнов В.К. Калибровка прокатных валков / В.К. Смирнов, В.А. Шилов, Ю.В. Инатович. – М. : Metallurgija, 1987. – 368 с. 6. Тарновский И.Я. Элементы теории прокатки сложных профилей / И.Я. Тарновский, А.Н. Скороходов, Б.М. Илюкович. – М.: Metallurgija, 1972. – 352 с. 7. Васидзу К. Вариационные методы в теории упругости и пластичности: пер. с англ. / К. Васидзу – М.: Мир, 1987. – 542 с. 8. Медведев В.С. Теоретическое исследование течения металла в закрытых балочных калибрах методом конечных элементов / В.С. Медведев, П.В. Боровик, В.А. Шпаков, Е.В. Базарова // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. Донбасской государственной машиностроительной академии. – Краматорск: ДГМА, 2014. – №1(38). – С. 166–172. 9. Боровик П.В. Теоретичні дослідження процесів обробки металів тиском на основі методу скінчених елементів: Навч. посіб. / П.В. Боровик. – Алчевськ: ДонДТУ, 2012. – 170 с. 10. 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.

**Bibliography (transliterated):** 1. Zhadan V.T. Proizvodstvo dvutavrovyyh balok V.T. Zhadan, G.D. Fejgin, I.M. German – Moscow: Metallurgija, 1972. – 192 P. 2. Litovchenko N.V. Kalibrovka profilej i prokatnyh valkov N.V. Litovchenko. – Moscow: Metallurgija, 1990. – 432 P. 3. Chekmarev A.P. Kalibrovka prokatnyh valkov A.P. Chekmarev, M. P. Mut'ev, R.A. Mashkovcev. – Moscow: Metallurgija, 1971. – 521 P. 4. Bahtinov B.P. Kalibrovka prokatnyh valkov B.P. Bahtinov, M.M. Shternov. – Moscow: Metallurgizdat, 1953. – 783 P. 5. Smirnov V.K. Kalibrovka prokatnyh valkov V.K. Smirnov, V.A. Shilov, Ju.V. Inatovich. – Moscow: Metallurgija, 1987. – 368 P. 6. Tarnovskij I.Ja. Jelementy teorii prokatki slozhnyh profilej I.Ja. Tarnovskij, A.N. Skorohodov, B.M.. Iljukovich. – Moscow: Metallurgija, 1972. – 352 P. 7. Vasidzu K. Variacionnye metody v teorii uprugosti i plastichnosti: per. s angl. K. Vasidzu – Moscow: Mir, 1987. – 542 P. 8. Medvedev V. S. Teoreticheskoe issledovanie techenija metalla v zakrytyh balochnyh kalibrah metodom konechnykh jelementov V. P. Medvedev, P.V. Borovik, V.A. Shpakov, E.V. Bazarova Obrabotka materialov davleniem: sb. nach. tr. Donbasskoj gosudarstvennoj mashinostroitel'noj akademii. – Kramatorsk: DGMA, 2014. – No1(38). – P. 166–172. 9. Borovik P.V. Teoretychni doslidzhennja procesiv obrobky metaliv tyskom na osnovi metodu skinchenykh elementiv: Navch. posib. P.V. Borovik. – Alchevs'k: DonDTU, 2012. – 170 P. 10. Medvedev V. S. Jeksperimental'noe issledovanie techenija metalla v balochnyh kalibrah V. S. Medvedev, V.A. Shpakov, E.V. Bazarova Resursozberigajuchi tehnologii' vyrobnyctva ta obrobky tyskom materialiv u mashynobuduvanni: zb. nauk. prac' – Lugans'k: vyd-vo SNU im. V. Dalja. 2013. – No 1 (14). – P. 52–61.

Поступила (received) 26.10.2014