

УДК 621.771.2

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

ВЛИЯНИЕ ШИРИНЫ СТЕНКИ НА ИЗМЕНЕНИЕ ВЫСОТЫ ФЛАНЦЕВ В ЧЕРНОВЫХ ЗАКРЫТЫХ БАЛОЧНЫХ КАЛИБРАХ

При проектировании калибровок валков для производства двутавровых балок перед разработчиком технологии стоит задача определения высотной деформации (утяжки или приращения) открытых и закрытых фланцев, которая зависит от многих технологических факторов, в том числе и от ширины стенки в разрезных балочных калибрах.

Настоящая статья является продолжением проведенных авторами теоретических исследований течения металла в черновых закрытых балочных калибрах методом конечных элементов [1–3]. В этих работах на базе программного комплекса ABAQUS была разработана трехмерная конечно-элементная математическая модель прокатки, исследовано напряженно-деформированное состояние металла в очаге деформации, выявлены основные закономерности течения металла в калибрах, определены параметры формоизменения металла при варьировании технологических факторов, в частности, установлено влияние обжатия стенки на изменение высоты фланцев.

Целью работы является определение влияния ширины стенки на высотную деформацию фланцев в черновых закрытых балочных калибрах.

Влияние ширины стенки на высотную деформацию фланцев исследовали на теоретической модели прокатки двутавровых заготовок из стали Ст3 при температуре 1 100 °С в закрытых балочных калибрах (рис. 1) с различной шириной стенки. Ширину стенки B в калибре варьировали в пределах от 65 до 185 мм (ширина стенки заготовки в каждом калибре была на 8,4 мм меньше, чем ширина стенки калибра). Шаг варьирования ширины B в пределах от 65 до 125 мм составлял 10 мм, а от 125 до 185 мм – 30 мм. Отношение ширины стенки B к ее толщине d изменялось от 2,36 до 6,73. Обжатие по стенке во всех калибрах составляло 37,7 мм. Размеры фланцев в заготовках при варьировании ширины B оставались постоянными.

Размеры заготовки с минимальной шириной стенки – 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 $h_3 = 21,1$ мм, $a_3 = 12,1$ мм, $b_3 = 24,1$ мм; высота заготовки $H = 102,6$ мм.

Размеры закрытого балочного калибра с минимальной шириной стенки – толщина и ширина стенки $d = 27,5$ мм, $b_k = 65,0$ мм; открытый фланец $h_o = 30,75$ мм, $a_o = 9$ мм, $b_o = 21,0$ мм; закрытый фланец $h_3 = 30,75$ мм, $a_3 = 9,75$ мм, $b_3 = 22,5$ мм; высота калибра $H = 89$ мм. Начальный диаметр валков 340 мм (калибровка валков приведена в работе [4]).

В результате математического моделирования процесса прокатки выявлены основные закономерности течения металла в закрытых балочных калибрах, получены эпюры распределения напряжений и перемещений в поперечных и продольных сечениях профиля, определены зависимости высотной деформации полок, открытых и закрытых фланцев от ширины стенки. Основные параметры формоизменения приведены в табл. 1.

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.

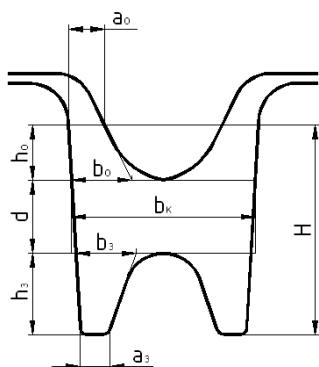


Рис. 1. Черновой закрытый балочный калибр

Таблица 1

Основные параметры формоизменения металла при прокатке в закрытых балочных калибрах с различной шириной стенки (в заготовке толщина стенки $d = 65,2$ мм, в калибре $d = 27,5$ мм)

№ образцов	Размеры поперечного сечения полосы после прокатки				Деформации							
					стенка		полка		открытый фланец		закрытый фланец	
	B , мм	H , мм	h_o , мм	h_3 , мм	B/d , мм	η_d	ΔH , мм	η_H	Δh_o , мм	η_{h_o}	Δh_3 , мм	η_{h_3}
Заг.		102,6	16,3	21,1								
1	65,0	84,7	30,1	27,1	2,36	2,371	17,9	1,211	13,8	0,542	6,0	0,779
2	75,0	85,8	30,9	27,4	2,73	2,371	16,8	1,196	14,6	0,528	6,3	0,770
3	85,0	86,7	31,4	27,8	3,10	2,371	15,9	1,184	15,1	0,519	6,7	0,759
4	95,0	86,2	31,0	27,7	3,45	2,371	16,5	1,190	14,7	0,526	6,6	0,762
5	105,0	85,8	30,8	27,5	3,82	2,371	16,8	1,196	14,5	0,529	6,4	0,767
6	115,0	85,4	30,4	27,5	4,18	2,371	17,2	1,201	14,1	0,536	6,4	0,767
7	125,0	83,9	29,3	27,1	4,55	2,371	18,7	1,223	13,0	0,556	6,0	0,779
8	155,0	80,6	27,1	26,0	5,64	2,371	22,0	1,273	10,8	0,601	4,9	0,812
9	185,0	78,9	26,6	24,8	6,73	2,371	23,7	1,300	10,3	0,613	3,7	0,851

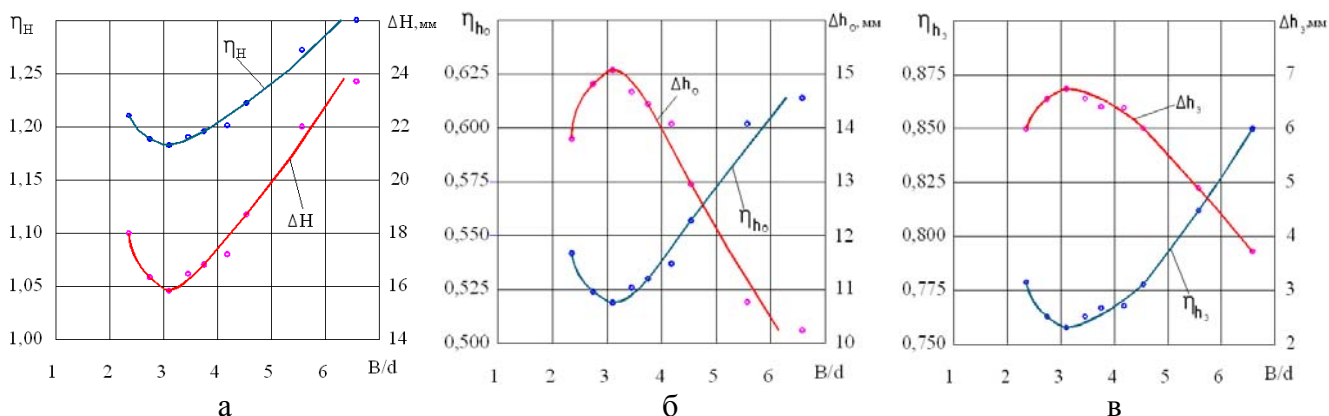


Рис. 2. Зависимость высотной деформации полок (а), открытых (б) и закрытых (в) фланцев от ширины стенки (отношения B/d) в закрытом балочном калибре.

Установлено, что высотная деформация фланцев в черновых закрытых балочных калибрах в зависимости от ширины стенки имеет сложный характер. Во всем диапазоне изменения отношения B/d от 2,36 до 6,73 имеет место уменьшение общей высоты полок H при одновременном увеличении высоты открытых h_o и закрытых h_3 фланцев.

Высота полок H уменьшается с 102,6 до 78,9 мм. Утяжка полок ΔH изменяется в пределах от 15,9 до 23,7 мм, а коэффициент высотной деформации полок η_H от 1,184 до 1,300 (рис. 2, а).

Приращение высоты открытых фланцев Δh_o изменяется от 10,3 до 15,1 мм. Коэффициент высотной деформации открытого фланца η_{h_o} находится в пределах от 0,519 до 0,613 (рис. 2, б). Интенсивность роста приращения высоты закрытых фланцев меньше, чем открытых. Приращение Δh_z изменяется от 3,7 до 6,7 мм, а коэффициент η_{h_z} от 0,759 до 0,851 (рис. 2, в).

Приращение высоты открытых и закрытых фланцев сначала возрастает, а затем плавно уменьшается. Максимум приращений Δh_o , Δh_z и минимум утяжки ΔH находятся при $B/d = 3,10$. Более интенсивному росту приращения фланцев в диапазоне $B/d = 2,36 \div 3,10$ способствуют повышенное уширение металла при обжатии в узком очаге деформации на участке активно обжимаемой стенки, а также действие на металл разрезающих гребней валков, которые интенсивно смещают его в направлении от оси калибра в сторону фланцев. Уменьшение Δh_o и Δh_z по мере увеличения ширины стенки в диапазоне $B/d = 3,10 \div 6,73$ обусловлено изменением соотношения массы фланцев и стенки. Увеличение массы активно обжимаемой стенки вызывает повышение вытяжки профиля в целом. В результате фланцы, имеющие меньшую массу, получают дополнительную вытяжку, которая вызывает снижение Δh_o и Δh_z .

Установленный с помощью математической модели характер высотной деформации фланцев в зависимости от ширины стенки подтверждается экспериментальными исследованиями течения металла в пластовых тавровых элементах балочных калибров [5].

При увеличении ширины стенки существенно изменяется напряженно-деформированное состояние металла. Изменяются не только абсолютные значения напряжений и деформаций, но и характер их распределения в очаге деформации.

На рис. 3 и 4 показаны примеры эпюр распределения эквивалентных напряжений S по Мизесу в поперечном и продольном сечениях полосы, а на рис. 5–7 примеры эпюр перемещений U_1 , U_2 и U_3 в соответствующих сечениях при прокатке в калибрах с шириной стенки 65 и 155 мм.

Абсолютные значения напряжений в поперечном сечении профиля изменяются в очень широких пределах: от +10 до +95 МПа. При этом наблюдается общая тенденция повышения напряжений при увеличении ширины стенки. В открытых и закрытых фланцах профиля уровень напряжений в целом ниже, чем в стенке.

В узких калибрах при малой ширине стенки ($B/d < 3,45$) область наибольших напряжений +75 МПа располагается на стенке в объемах металла, примыкающих к разрезающим гребням верхнего и нижнего ручьев валков по всей их ширине, и на боковых внутренних поверхностях открытых и закрытых фланцев (рис 3, а). По вертикали напряжения в стенке постепенно уменьшаются и у ее горизонтальной оси составляют +25...+35 МПа. На наружных боковых поверхностях фланцев и стенки напряжения еще ниже +15...+25 МПа.

В широких калибрах ($B/d > 3,45$) максимальные напряжения возрастают до +95 МПа и локализуются у разрезающих гребней в местах сопряжения стенки с фланцами (рис 3, б). В средней части стенки и в зонах на ее горизонтальной оси напряжения в 1,5–2,0 раза меньше, чем возле гребней балочного калибра.

Характер распределения напряжений в продольном сечении профиля обусловлен влиянием на напряженное состояние металла неравномерного распределения обжатия по ширине балочного калибра. В результате на основные напряжения накладываются еще и так называемые дополнительные напряжения растяжения или сжатия [6, 7]. В балочном калибре за счет большего обжатия стенки, металл стремится приобрести большую вытяжку, чем во фланцах. Поскольку полоса является жестким телом, то после выхода из очага деформации стенка и фланцы имеют одинаковую вытяжку и длину. Вследствие этого в стенке возникают дополнительные напряжения сжатия, а во фланцах – растяжения. Уровень этих напряжений определяется степенью неравномерности обжатий по стенке и фланцам профиля.

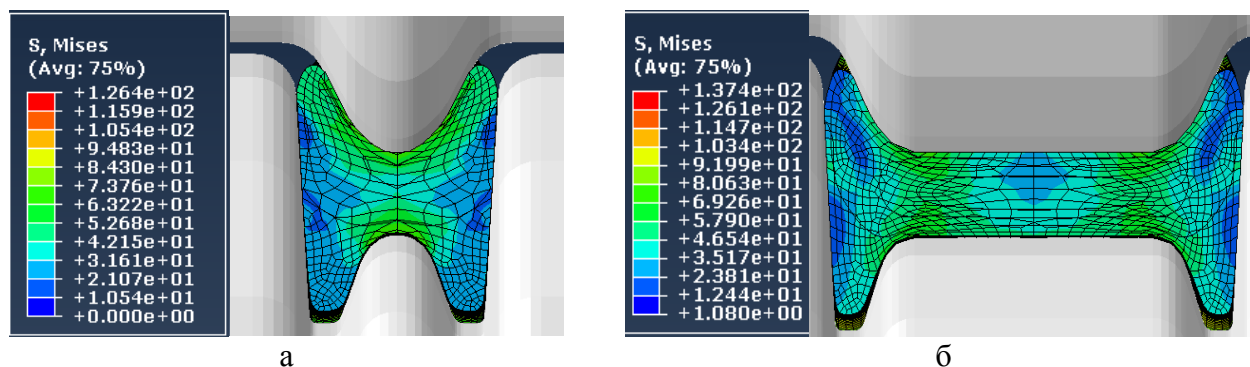


Рис. 3. Эпюры распределения эквивалентных напряжений по Мизесу в поперечном сечении профиля при ширине стенки 65 мм (а) и 155 мм (б)

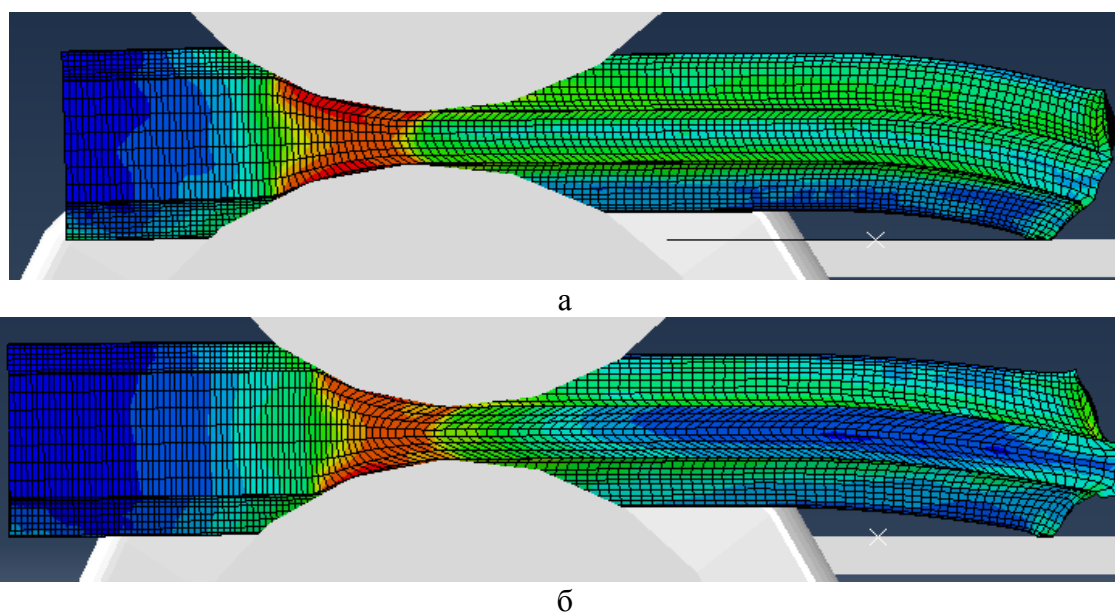


Рис. 4. Эпюры распределения эквивалентных напряжений по Мизесу в продольном сечении профиля при ширине стенки 65 мм (а) и 155 мм (б)

Приведенные на рис. 4 эпюры распределения напряжений в продольном сечении профиля характерны для всех балочных калибров и их вид практически не зависит от ширины стенки. Наибольшие напряжения сжатия +126...+141 МПа имеют место в геометрическом очаге деформации (меньшее значение при $B/d = 2,36$, большее при $B/d = 6,73$). Область максимальных напряжений в геометрическом очаге деформации со стороны входа и выхода ограничена параболой, оси которых совпадают с осью прокатки, проходящей через середину стенки профиля. Ветви парабол направлены в противоположные стороны (к жестким концам полосы). Расстояние между вершинами парабол составляет 0,60–0,75 от длины геометрического очага деформации на стенке профиля. Во внеконтактных зонах на входе и выходе из геометрического очага деформации напряжения плавно уменьшаются в направлениях к заднему и переднему жестким концам полосы до минимальных значений +10...+25 МПа. Протяженность внеконтактных зон для узких калибров составляет 0,4–0,5, а для широких 0,8–0,9 от длины геометрического очага деформации.

Анализ эпюр вертикальных перемещений U_2 частиц металла в поперечном сечении профиля показывает, что на участке стенки имеет место симметричная относительно горизонтальной оси деформация металла. Области максимальных вертикальных перемещений, равные 18,85 мм (половине суммарного обжатия стенки Δd), находятся на поверхностях контакта металла с верхним и нижним разрезающими гребнями валков. По толщине стенки перемещения U_2 плавно затухают. Нейтральное сечение, где перемещения меняют знак, совпадает с горизонтальной осью стенки.

Во фланцах и в переходных зонах на стыке фланцев со стенкой наблюдается значительная асимметрия в вертикальных перемещениях металла. В открытых фланцах перемещения существенно ниже, чем в закрытых. В зависимости от ширины стенки перемещения U_2 на свободных поверхностях металла у концов открытых фланцев изменяются в пределах от $-3,75$ до $-8,55$ мм, а у концов закрытых фланцев от $+12,15$ до $+15,15$ мм. Причем по мере увеличения ширины стенки они сначала уменьшаются до своего минимального значения, а затем опять возрастают. Минимальные значения перемещений U_2 находятся в калибрах с отношением $B/d = 3,10$.

Асимметрия в перемещениях U_2 на участках фланцев объясняется различным воздействием на металл закрытых и открытых ручьев балочного калибра.

В закрытых ручьях фланцы образуются врезом только в один валок, уклоны внешних и внутренних граней направлены в разные стороны. Закрытые ручьи представляют собой узкие щели. В них формируются зоны затрудненной деформации. При боковом обжатии в закрытых ручьях происходит заклинивание металла и его течение вглубь ручьев затруднено.

В открытых ручьях фланцы образуются врезом в два валка, а уклоны внешних и внутренних граней направлены в одну сторону. При боковом обжатии металл здесь не заклинивается и свободно течет в направлении к концам фланцев.

Анализ эпюр распределения перемещений U_2 показывает о преимущественном течении металла в сторону открытых фланцев. Это подтверждает и смещение в ту же сторону нейтральных сечений в переходных зонах на стыке фланцев со стенкой.

Во всем диапазоне изменения ширины стенки профиля характер распределения вертикальных перемещений U_2 качественно не меняется. Изменяются лишь числовые значения перемещений.

Приращения высоты открытых и закрытых фланцев Δh_o и Δh_z рассчитываются как разность максимальных перемещений U_2 в стенке профиля (на поверхностях контакта металла с верхним и нижним разрезающими гребнями валков) и перемещений U_2 на свободных поверхностях металла у концов соответствующих фланцев.

Горизонтальные перемещения U_1 частиц металла в поперечном сечении профиля имеют сложный характер. Во всем этом сечении металл течет в направлениях от вертикальной оси профиля к наружным боковым стенкам калибра. В стенке профиля перемещения U_1 происходят в основном за счет уширения металла под воздействием ее прямого обжатия по толщине и вследствие растяжения стенки разрезающими гребнями валков. В открытых и закрытых фланцах на эти перемещения накладываются еще и дополнительные перемещения металла, связанные с боковым обжатием фланцев.

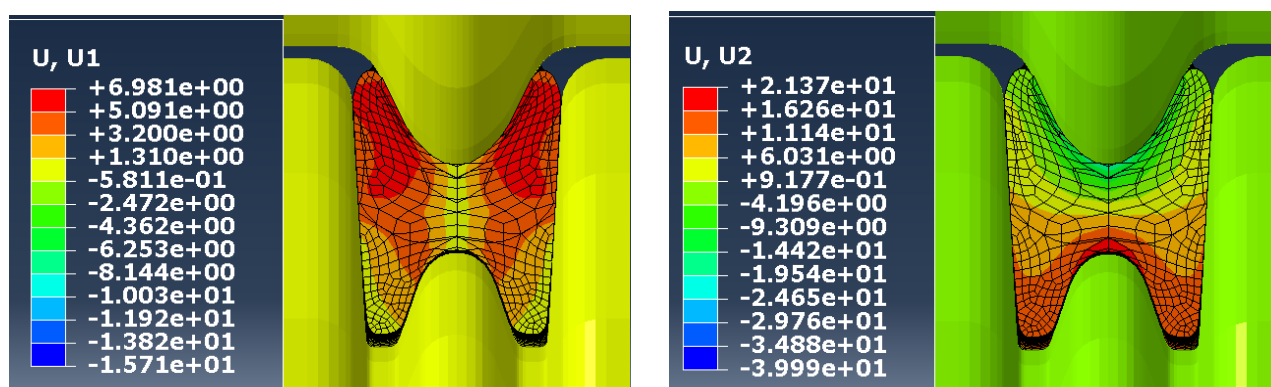


Рис. 5. Эпюры распределения перемещений в горизонтальном U_1 и вертикальном U_2 направлениях на поперечном сечении профиля при ширине стенки 65 мм

Увеличение ширины стенки влияет на характер распределения горизонтальных перемещений металла. При минимальной ширине стенки наибольшие перемещения U_1 , равные $+6,5$ мм, имеют место в открытых фланцах и переходных зонах на стыке их со стенкой.

По мере увеличения ширины стенки область максимальных перемещений от открытых фланцев сдвигается в направлении к стенке и при её максимальной ширине располагается в переходных зонах сопряжения фланцев со стенкой. При этом максимальное значение перемещений U_1 составляет +14 мм. Наименьшие горизонтальные перемещения металла наблюдаются в зонах, прилегающих к наружным граням закрытых фланцев.

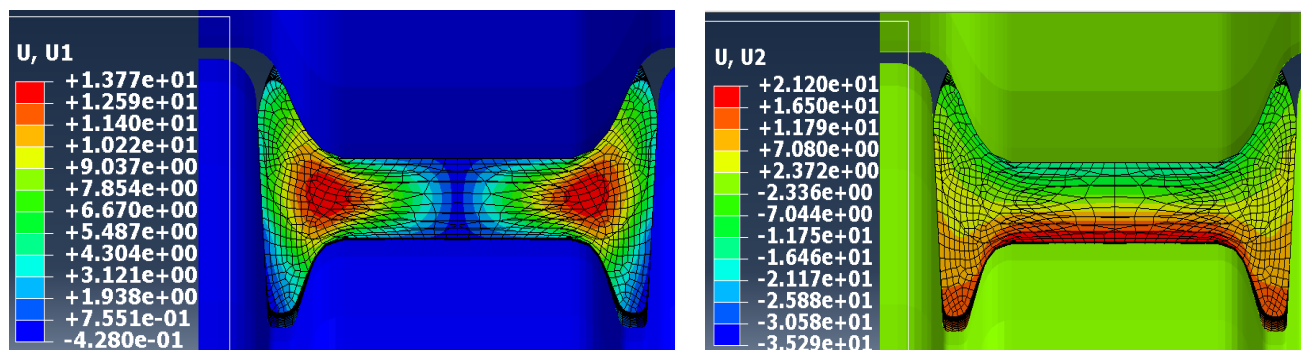


Рис. 6. Эпюры распределения перемещений в горизонтальном U_1 и вертикальном U_2 направлениях на поперечном сечении профиля при ширине стенки 155 мм

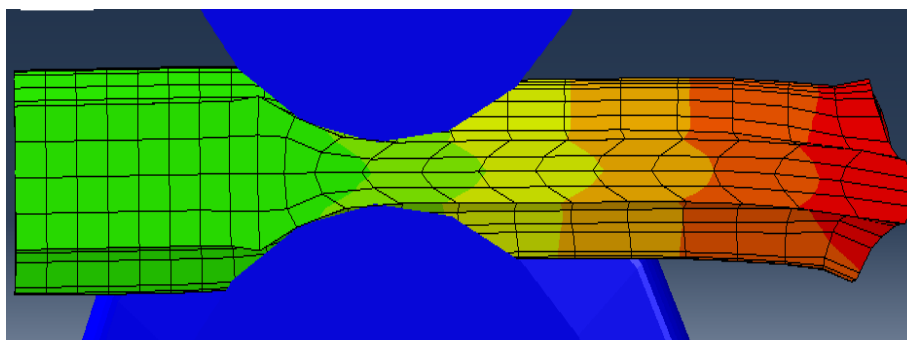


Рис. 7. Характерная эпюра распределения перемещений U_3 в продольном – вертикальном сечении профиля (по середине стенки)

Распределение перемещений U_3 частиц металла в продольно-вертикальном сечении профиля не зависит от ширины стенки. Приведенная на рис. 7 эпюра перемещений U_3 характерна для узких и широких калибров.

Из анализа результатов теоретических исследований следует важный для практики вывод: для получения двутавровых балок с высокими фланцами черновые закрытые балочные калибры необходимо проектировать с сохранением отношения B/d в пределах от 2,5 до 4,0. При этих отношениях имеет место наибольшие приращения высоты фланцев.

На основании проведенных исследований разработаны предложения по совершенствованию технологии прокатки и калибровок валков двутавровых балок № 14 на крупно-сортном стане 600 ПАО «АМК».

ВЫВОДЫ

Проведенные теоретические исследования течения металла в черновых закрытых балочных калибрах методом конечных элементов позволили определить основные закономерности распределения напряжений, перемещений и деформаций в поперечном и продольном сечениях профиля, а также интегральные параметры формоизменения – приращение высоты открытых и закрытых фланцев и утяжку высоты полков в зависимости от ширины стенки профиля. Установлено, что с увеличением ширины стенки приращение высоты фланцев сначала возрастает, а затем плавно уменьшается. Разработаны рекомендации по выбору рациональных соотношений ширины стенки к ее толщине в черновых закрытых балочных калибрах.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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 : сборник научных трудов*. – Краматорск : ДГМА. – 2014. – № 1 (38). – С. 166–172.
2. Боровик П. В. Теоретичні дослідження процесів обробки металів тиском на основі методу скінчених елементів : навч. посіб. / П. В. Боровик. – Алчевськ : ДонДТУ. – 2012. – 170 с.
3. Медведев В. С. Влияние обжатия стенки на изменение высоты фланцев в черновых закрытых балочных калибрах элементов / В. С. Медведев, Е. В. Базарова, В. А. Шпаков // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Зб. наук. пр. Серія : Інформаційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків : НТУ «ХПІ». – 2014. – № 43 (1086). – С. 81–88.
4. 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.
5. Медведев В. С. Экспериментальное исследование течения металла в пластовых тавровых элементах фасонных калибров / В. С. Медведев // *Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні : зб. наук. пр.* – Луганськ : Вид-во СНУ ім. Даля. – 2008. – С. 64–71.
6. Грудев А. П. Теория прокатки / А. П. Грудев – М. : Металлургия. – 1988. – 240 с.
7. Данченко В. Н. Теория процессов обработки металлов давлением / В. Н. Данченко, В. Н. Гринкевич, А. Н. Головки. – Днепропетровск : Пороги. – 2010. – 386 с.

REFERENCES

1. Teoreticheskoe issledovanie techenija metalla v zakrytyh balochnyh kalibrah metodom konechnykh jelementov / V. S. Medvedev, P. V. Borovik, V. A. Shpakov, E. V. Bazarova // *Obrabotka materialov davleniem : sbornik nauchnykh trudov*. – Kramatorsk : DGMA. – 2014. – № 1 (38). – S. 166–172.
2. 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.
3. Medvedev V. S. Vlijanie obzhatija stenki na izmenenie vysoty flancev v chernovyh zakrytyh balochnyh kalibrah jelementov / V. S. Medvedev, E. V. Bazarova, V. A. Shpakov // *Visnik Nacional'nogo tehnicnogo universitetu «HPI»*. Zb. nauk. pr. Serija : Informacijni tehnologii ta obladnannja obrobki materialiv u mashinobuduvanni ta metalurgii. – Harkiv : NTU «HPI». – 2014. – № 43 (1086). – S. 81–88.
4. Medvedev V. S. Jeksperimental'noe issledovanie techenija metalla v balochnyh kalibrah / V. S. Medvedev, V. A. Shpakov, E. V. Bazarova // *Resursozberigajuchi tehnologii virobnictva ta obrobki tiskom materialiv u mashinobuduvanni : zb. nauk. prac'* – Lugans'k : Vid-vo SNU im. V. Dalja. – 2013. – № 1 (14). – S. 52–61.
5. Medvedev V. S. Jeksperimental'noe issledovanie techenija metalla v plastovyh tavrovyh jelementah fasonnyh kalibrov / V. S. Medvedev // *Resursozberigajuchi tehnologii virobnictva ta obrobki tiskom materialiv u mashinobuduvanni : zb. nauk. pr.* – Lugans'k : Vid-vo SNU im. Dalja. – 2008. – S. 64–71.
6. Grudev A. P. Teorija prokatki / A. P. Grudev – M. : Metallurgija. – 1988. – 240 s.
7. Danchenko V. N. Teorija processov obrabotki metallov davleniem / V. N. Danchenko, V. N. Grinkevich, A. N. Golovko. – Dnepropetrovsk : Porogi. – 2010. – 386 s.

Медведев В. С. – д-р техн. наук, гл. науч. сотр. ГП «УкрНТЦ «Энергосталь»

Шпаков В. А. – канд. техн. наук, доц. ДонГТУ

Базарова Е. В. – ассистент ДонГТУ

ГП«УкрНТЦ «Энергосталь» – Государственное предприятие «Украинский научно-технический центр металлургической промышленности «Энергосталь», г. Харьков;
ДонГТУ – Донбасский государственный технический университет, г. Лисичанск.

E-mail: katy8007@i.ua; niimet@energostal.org.ua