

УДК 621.771.26.001

Медведев В.С. д.т.н.; Базарова Е.В.

Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск, Украина

## ВЛИЯНИЕ БОКОВОГО ОБЖАТИЯ ФЛАНЦЕВ НА ИЗМЕНЕНИЕ ИХ ВЫСОТЫ В ЧЕРНОВЫХ ЗАКРЫТЫХ БАЛОЧНЫХ КАЛИБРАХ

Medvedev V., Bazarova E.

Donbass state technical university, Alchevsk, Ukraine (k\_OMD@ukr.net)

### INFLUENCE OF SIDE WORK OF FLANGES ON CHANGE OF THEIR HEIGHT IN ROUGHING CLOSED GIRDER PASSES

*Приведены результаты математического моделирования течения металла в черновом закрытом балочном калибре методом конечных элементов. Показано распределение напряжений, перемещений и деформаций в поперечном и продольном сечениях профиля. Определены интегральные параметры формоизменения – приращение высоты открытых и закрытых фланцев и утяжка высоты полок в зависимости от бокового обжатия фланцев профиля. Установлено, что с увеличением бокового обжатия фланцев приращение высоты открытых и закрытых фланцев уменьшается. Для получения двутавров повышенной точности со стабильными размерами по ширине полок черновые закрытые балочные калибры необходимо проектировать с минимальным боковым обжатием фланцев, при котором в первых проходах можно получить высокие фланцы и обеспечить их надежную высотную деформацию в чистовых контрольных калибрах. Рекомендуется эти калибры проектировать с учетом среднего коэффициента деформации по толщине открытых и закрытых фланцев не более 1,3.*

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

**Введение.** На металлургических предприятиях Украины двутавры по ГОСТ 8239-89 изготавливают в соответствии с требованиями категории В (профили обычной точности). Производство двутавров с более высокими качественными показателями категории Б (профили повышенной точности) ограничено трудностями выполнения жестких требований стандарта на предельные отклонения на геометрические размеры профиля. Причины этому разные, но в основном они обусловлены техническим состоянием рельсобалочных и крупносортовых станков, отсутствием в их составе универсальных клетей, а также нерациональностью применяемых технологических процессов и калибровок валков. Использование в двухвалковых клетях некоторых станков специальных кассет с неприводными вертикальными валками [1] не обеспечивает должной жесткости конструкции универсального калибра и не решает проблему организации производства двутавров повышенной точности в целом.

Проведенный авторами анализ точности двутавров №14 на стане 600 ПАО «АМК» [2] показал, что готовая продукция не соответствует категории Б по такому показателю как симметричность профиля, хотя в целом ширина полок находится в пределах допусков, соответствующих требованиям ГОСТ 8239-89 к профилям повышенной точности. На готовом профиле все четыре фланца имеют разную высоту. Профиль асимметричен относительно горизонтальной и вертикальной осей. Разность высоты фланцев достигает 2,2 мм. Такая асимметрия профиля свидетельствует о недостаточном обжатии металла по высоте в закрытых фланцах черновых двухвалковых балочных калибров и в контрольных вспомогательных калибрах чистовых клетей.

Для повышения симметричности готовых профилей и получения стабильных размеров по ширине полок необходимо в черновых фасонных калибрах получать достаточно высокие фланцы, а затем обеспечивать их надежную высотную деформацию в чистовых контрольных калибрах. Опыт прокатки двутавров показывает, что влиять на высотную деформацию фланцев и управлять конечным формоизменением металла, с целью получения готовых профилей с точными размерами, можно путем перераспределения обжатий по отдельным элементам профиля в черновых калибрах (в закрытых балочных калибрах регулированием прямого обжатия стенки и бокового обжатия открытых и закрытых фланцев). Для осуществления такого управления необходимо иметь надежные методы расчета формоизменения металла в фасонных калибрах, учитывающих влияние многих технологических факторов на процесс прокатки.

Настоящая статья является продолжением проведенных авторами теоретических исследований течения металла в черновых закрытых балочных калибрах методом конечных элементов [3-7]. 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 прямого обжатия стенки и ее ширины на изменение высоты фланцев.

**Целью** данного исследования является повышение точности изготовления двутавровых профилей путем определения закономерностей влияния бокового обжатия фланцев на их высотную деформацию в черновых закрытых балочных калибрах.

**Исследование.** Влияние бокового обжатия фланцев на их высотную деформацию исследовали на модели прокатки на стане 340 двутавровых заготовок из стали Ст.3 при температуре 1100°C в трех закрытых балочных калибрах (рис. 1) с различной толщиной фланцев. Толщину открытых фланцев  $t_o$  в калибре варьировали в пределах от 15 до 12 мм, а закрытых фланцев  $t_z$  от 16,125 до 13,125 мм. Шаг варьирования толщины фланцев составлял 1,5 мм.

Обжатие по стенке во всех калибрах равно 37,7 мм. Толщина и ширина стенки в калибрах и заготовках при варьировании размеров фланцев оставались постоянными. 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 базового 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 [7]).

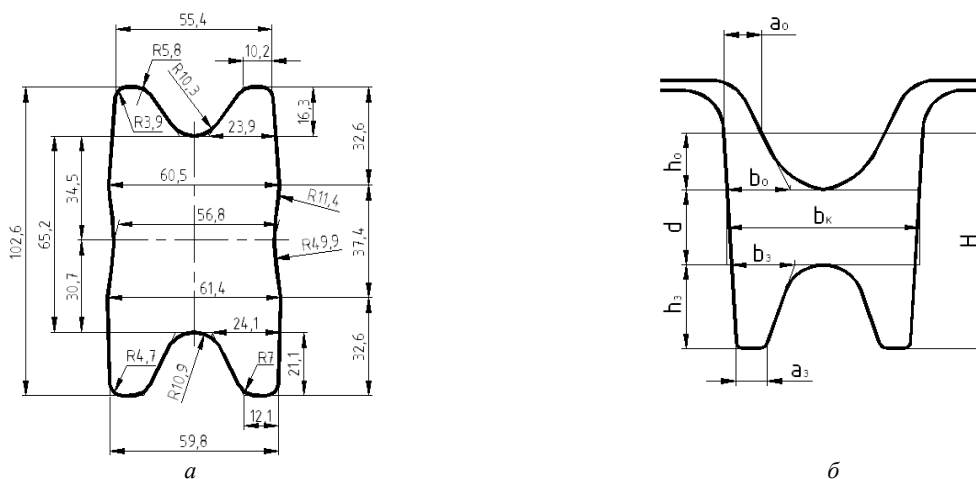


Рис. 1. Поперечное сечение исходной заготовки (а) и черновой закрытый балочный калибр (б)

Формоизменение металла характеризовали следующими параметрами деформации:  $\Delta H = H - H'$  – 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;  $\Delta h_z = h'_z - h_z$  – абсолютное приращение высоты закрытого фланца;  $\eta_{h_z} = h'_z / h'_z$  – коэффициент высотной деформации закрытого фланца;  $\eta_{t_o} = t_{o_0} / t_{o_1}$  – коэффициент бокового обжатия открытого фланца,  $t_{o_0}$ ,  $t_{o_1}$  – средняя толщина открытого фланца заготовки до и после прокатки соответственно;  $\eta_{t_z} = t_{z_0} / t_{z_1}$  – коэффициент бокового обжатия закрытого фланца,  $t_{z_0}$ ,  $t_{z_1}$  – средняя толщина закрытого фланца заготовки до и после прокатки соответственно. Боковое обжатие фланцев в калибре оценивали средним коэффициентом деформации  $\eta_t$  по толщине открытых и закрытых фланцев, равным  $\eta_t = 0,5 (\eta_{t_o} + \eta_{t_z})$ . Расчетный коэффициент  $\eta_t$  при варьировании толщины фланцев составлял 1,102; 1,195 и 1,305.

В результате моделирования процесса прокатки определены основные параметры формоизменения металла в черновых закрытых балочных калибрах, установлены зависимости высотной утяжки полок, приращения высоты открытых и закрытых фланцев от их бокового обжатия (рис. 2 и 3, табл.1), получены эпюры распределения напряжений и деформаций в продольных и поперечных сечениях профиля.

Установлено, что во всем диапазоне изменения среднего коэффициента деформации  $\eta_t$  от 1,102 до 1,305 имеет место уменьшение общей высоты полок  $H$ , высоты открытых  $h_o$  и закрытых  $h_z$  фланцев. С ростом  $\eta_t$  приращение высоты обоих фланцев  $\Delta h_o$  и  $\Delta h_z$  уменьшается. Причем интенсивность уменьшения приращения высоты закрытых фланцев больше, чем открытых.

Высота полок  $H$  уменьшается с 84,7 до 79,5 мм. Утяжка полок  $\Delta H$  увеличивается с 17,9 до 23,1 мм, коэффициент  $\eta_H$  возрастает с 1,211 до 1,291.

Высота открытых фланцев  $h_o$  уменьшается с 30,1 до 28,8 мм. При этом приращение высоты открытых фланцев  $\Delta h_o$  снижается с 13,8 до 12,5 мм, а коэффициент  $\eta_{h_o}$  возрастает с 0,542 до 0,566.

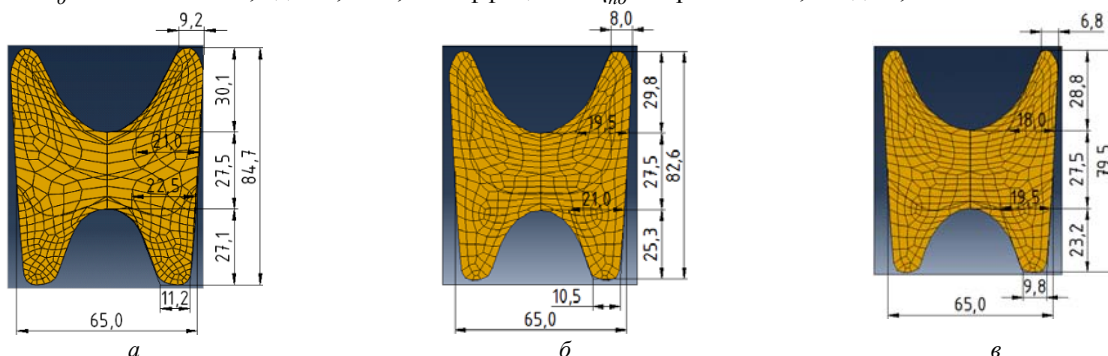


Рис. 2. Размеры поперечных сечений полос после прокатки при  $\eta_t = 1,102$  (а),  $\eta_t = 1,195$  (б) и  $\eta_t = 1,305$  (в)

Основные параметры формоизменения металла при прокатке в закрытых балочных калибрах с различным боковым обжатием фланцев (в заготовке толщина стенки  $d = 65,2$  мм, в калибре  $d = 27,5$  мм) (в заготовке ширина стенки равна ее толщине  $B/d = 1$ )

Таблица 1

№	Размеры поперечного сечения полосы после прокатки							Деформации								
								полка		открытый фланец			закрытый фланец			
	$a_o$ мм	$b_o$ мм	$a_3$ мм	$b_3$ мм	$H$ мм	$h_o$ мм	$h_3$ мм	$\Delta H$ мм	$\eta_H$	$\Delta h_o$ мм	$\eta_{h_o}$	$\eta_{t_o}$	$\Delta h_3$ мм	$\eta_{h_3}$	$\eta_{t_3}$	
Заг.	10,2	23,9	12,1	24,1	102,6	16,3	21,1									
1	9,2	21,0	11,2	22,5	84,7	30,1	27,1	17,9	1,21	13,8	0,54	1,13	6,0	0,78	1,07	
2	8,0	19,5	10,5	21,0	82,6	29,8	25,3	20,0	1,24	13,5	0,55	1,24	4,2	0,83	1,15	
3	6,8	18,0	9,8	19,5	79,5	28,8	23,2	23,1	1,29	12,5	0,57	1,38	2,1	0,91	1,24	

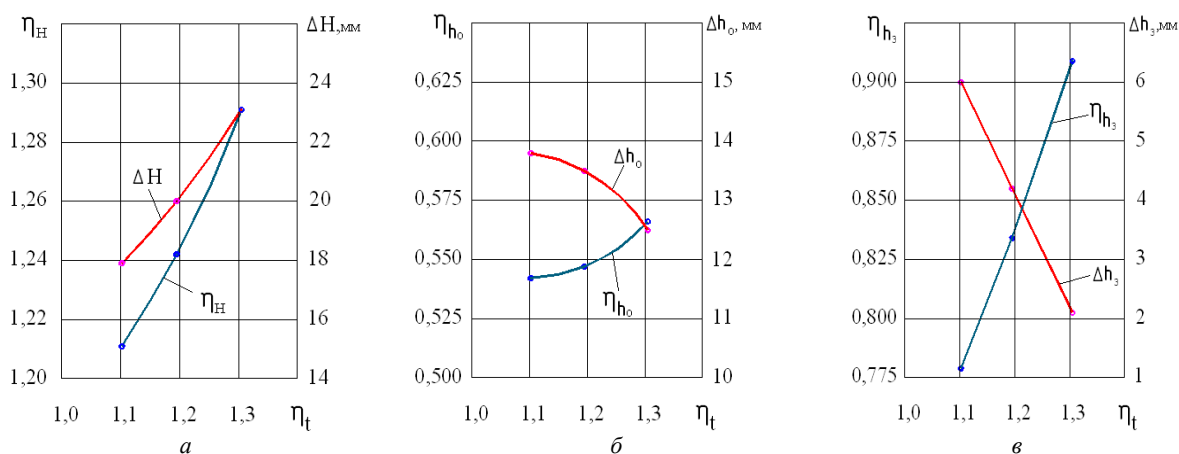


Рис. 3. Зависимость высотной деформации полок (а), открытых (б) и закрытых (в) фланцев от бокового обжатия фланцев

Высота закрытых фланцев  $h_3$  уменьшается с 27,1 до 23,2 мм. Приращение  $\Delta h_3$  снижается с 6,0 до 2,1 мм, коэффициент  $\eta_{h_3}$  увеличивается с 0,779 до 0,909.

Значительное уменьшение приращения высоты закрытых фланцев по сравнению с открытыми обусловлено разным характером течения металла в закрытых и открытых ручьях балочных калибров.

Боковые поверхности открытых ручьев образованы разными валками. При прохождении полосы через калибр эти поверхности сближаются, осуществляя активное боковое обжатие фланцев. Это способствует течению металла в направлении к концам фланцев.

Закриті ручьї врезані в один валок. Бокові поверхності не можуть змінювати свого взаємного положення. Обжаття закритих фланців по товщині відбувається за рахунок їх проволакування через закриті ручьї. Металл заклинюється в закритих ручьях внаслідок вертикального переміщення прямим обжаттям по стенці [8]. Течення металу кінцям фланців ускладнено. Тому в закритих фланцях спостерігається зменшення приросту висоти закритих фланців порівняно з відкритими.

Загальна тенденція зниження приросту висоти відкритих і закритих фланців при збільшенні їх бокового обжаття пояснюється труднощами затекання металу в більш вузькі щіли балочних калібрів, а також зміною співвідношення маси фланців і стінки.

Для кращого заповнення металом фланців балочні калібри необхідно проектувати так, щоб фланці максимально проникали вглубь ручьїв. Особливо це стосується закритих ручьїв. Рекомендують, щоб фланці безперешкодно входили в закриті ручьї не менше  $2/3$  їх глибини. При цьому бокове обжаття по основанню закритого фланця  $\Delta b_z$  повинно бути менше, ніж по основанню відкритого  $\Delta b_o$ . Це основне умову, забезпечуюче хороше заповнення закритих фланців по всій довжині раската. Воно підтверджено теоретичними дослідженнями І.Я. Винокурова [8] і багаторічними практичними спостереженнями В.Т. Жадана, Г.Д. Фейгина, І.М. Германа [9]. В протилежному випадку, коли  $\Delta b_o < \Delta b_z$ , спостерігається зростання висоти відкритих фланців і зменшення висоти закритих фланців, порушується вертикальне рівновагу в калібрі.

При збільшенні бокового обжаття фланців суттєво змінюється напружено-деформоване стан металу всередині очка деформації.

На рис. 4 і 5 показані епюри розподілу еквівалентних напружень  $S$  по Мизесу в поперечному і продольному сеченнях полоси, а на рис. 6-8 приклади епюр переміщень  $U_1$ ,  $U_2$  і  $U_3$  в відповідних сеченнях при прокатці в балочних калібрах при боковому обжатті фланців  $\eta_r = 1,102$  (а),  $\eta_r = 1,195$  (б) і  $\eta_r = 1,305$  (в).

Значення напружень в поперечному сеченні профіля змінюються в широких межах: від  $+10,5$  до  $+84,8$  МПа (рис. 4).

З збільшенням бокового обжаття фланців область найбільш високих напружень ( $+72,5 \dots +84,8$  МПа) переміщується від середини стінки до відкритих фланців, займаючи практично всю їх площу. В стінці максимальні напруження розташовані в об'ємах металу, примикаючих до розрізаючих гребенів верхнього і нижнього ручьїв валків по всій їх ширині. В середній частині стінки і в закритих фланцях напруження становлять  $+21 \dots +32$  МПа, що в  $2,6-3,5$  рази менше, ніж в зоні поруч гребенів. Найменші напруження локалізуються на зовнішніх бокових поверхностях стінки і приймають значення  $+10,6 \dots +21,4$  МПа. В закритих фланцях і в середній частині стінки профіля рівень напружень в цілому в  $2,5-3,5$  рази нижче, ніж в відкритих фланцях.

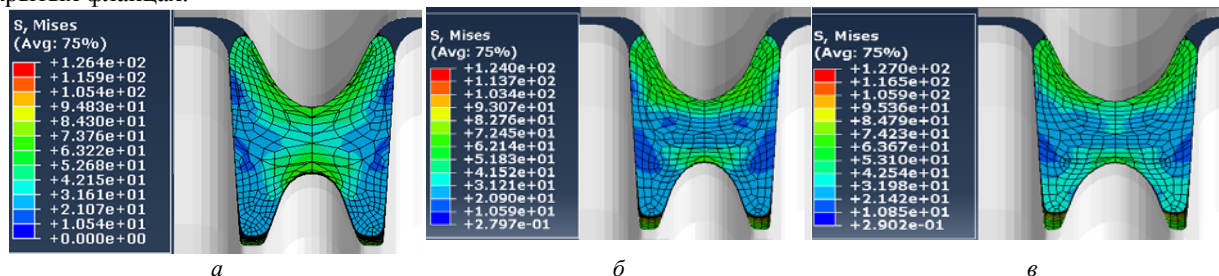


Рис. 4. Епюри розподілу еквівалентних напружень по Мизесу в поперечному сеченні профіля при  $\eta_r = 1,102$  (а),  $\eta_r = 1,195$  (б) і  $\eta_r = 1,305$  (в)

Абсолютні значення напружень і їх розподіл в продольно-вертикальному сеченні профіля (по середині стінки) практично не залежать від бокового обжаття фланців. Характерна епюра розподілу напружень приведена на рис. 5.

Найбільші напруження стиснення  $+124 \dots +127$  МПа мають місце в геометричному очагу деформації. Область максимальних напружень в геометричному очагу деформації зі сторони входу і виходу обмежена параболою, осі якої збігаються з осью прокатки, що проходить через середину стінки профіля. Ветви парабол направлені в протилежні сторони (до жорстких кінців полоси). Відстань між вершинами парабол становить  $0,60-0,75$  від довжини геометричного очка деформації на стінці профіля. В неконтактних зонах на вході і виході з геометричного очка деформації напруження плавно зменшуються в напрямках до заднього і переднього жорстких кінців полоси до мінімальних значень  $10,6 \dots +21,4$  МПа. Протяженість неконтактних зон становить  $0,8-0,9$  від довжини геометричного очка деформації.

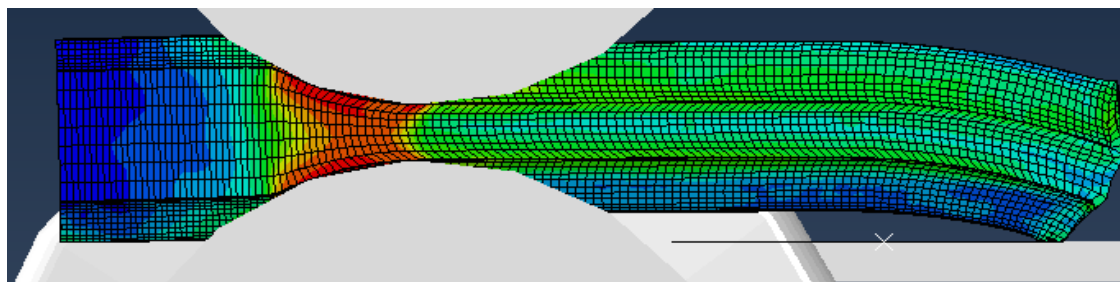


Рис. 5. Характерная эпюра распределения эквивалентных напряжений по Мизесу в продольно-вертикальном сечении профиля (по середине стенки)

Анализ эпюр вертикальных перемещений  $U_2$  частиц металла в поперечном сечении профиля (рис. 6) показывает, что на участке стенки имеет место симметричная относительно горизонтальной оси деформация металла. Области максимальных вертикальных перемещений, равных 18,85 мм (половине суммарного обжатия стенки  $\Delta d$ ), находятся на поверхностях контакта металла с верхним и нижним разрезающими гребнями валков. По толщине стенки в направлениях от контактных поверхностей к горизонтальной оси перемещения  $U_2$  плавно затухают от своих максимальных значений до нуля. 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 зависимости от бокового обжатия фланцев перемещения  $U_2$  на свободных поверхностях металла у концов открытых фланцев изменяются в пределах от  $-5,05$  до  $-4,35$  мм, а у концов закрытых фланцев от  $+12,85$  до  $+16,75$  мм.

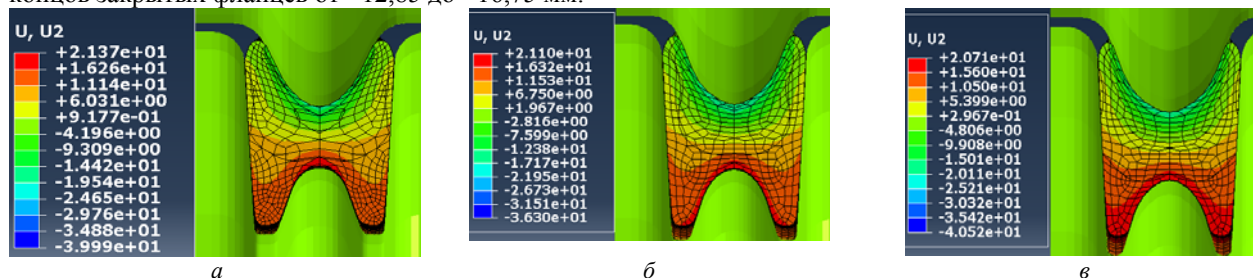


Рис. 6. Эпюры распределения перемещений в вертикальном  $U_2$  направлении на поперечном сечении профиля при  $\eta_t = 1,102$  (а),  $\eta_t = 1,195$  (б) и  $\eta_t = 1,305$  (в)

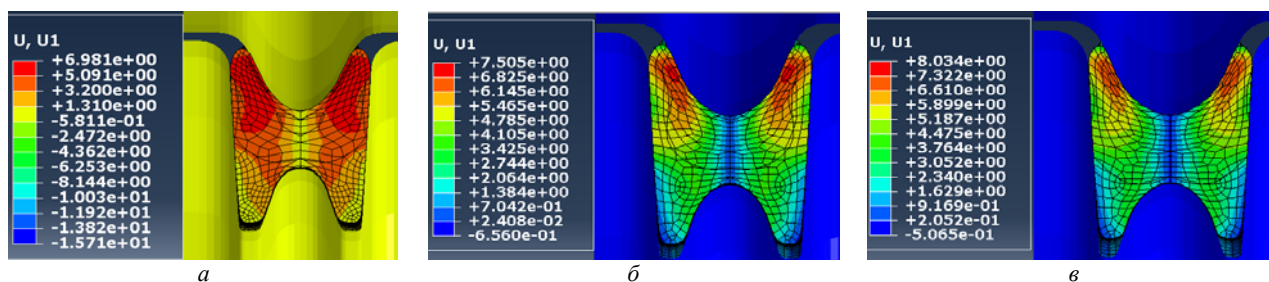


Рис. 7. Эпюры распределения горизонтальных перемещений  $U_1$  в поперечном сечении профиля при  $\eta_t = 1,102$  (а),  $\eta_t = 1,195$  (б) и  $\eta_t = 1,305$  (в)

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

Характер эпюр распределения перемещений  $U_2$  свидетельствует 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 бокового обжатия фланцев характер распределения вертикальных перемещений  $U_2$  качественно не меняется. Изменяется лишь числовые значения перемещений. Приращения высоты открытых и закрытых фланцев  $\Delta h_o$  и  $\Delta h_z$  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 фланцев.

Горизонтальные перемещения  $U_1$  частиц металла в поперечном сечении профиля (рис. 7) имеют сложный характер. Во всем сечении металл течет в направлениях от вертикальной оси профиля к наружным боковым стенкам калибра. В стенке профиля перемещение  $U_1$  происходит за счет уширения металла под воздействием



ее обжатия по толщине, а также из-за растяжения стенки разрезающими гребнями валков. В открытых и закрытых фланцах на эти перемещения накладываются еще и дополнительные перемещения металла, связанные с боковым обжатием фланцев.

Увеличение бокового обжатия фланцев влияет на характер распределения горизонтальных перемещений металла. При минимальном обжатии ( $\eta_f = 1,102$ ) наибольшие перемещения  $U_1$ , равные +6,5 мм, имеют место в открытых фланцах и переходных зонах на стыке их со стенкой. По мере увеличения обжатия фланцев до  $\eta_f = 1,305$  области максимальных перемещений  $U_1$  локализуются в зонах, прилегающих к внутренним граням открытых фланцев, и достигают значений +7,7 мм. Наименьшие горизонтальные перемещения металла наблюдаются в зонах, прилегающих к наружным граням закрытых фланцев.

Распределение перемещений  $U_3$  частиц металла в продольно-вертикальном сечении профиля (по середине стенки) не зависит от бокового обжатия фланцев. Характерная эпюра распределения перемещений  $U_3$  приведена на рис. 8.

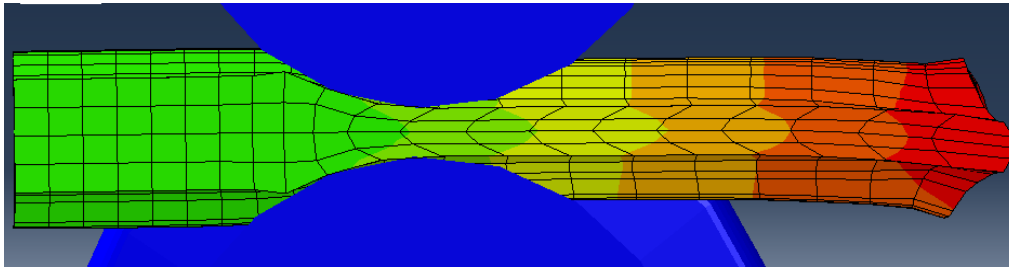


Рис. 8. Эпюра распределения перемещений  $U_3$  в продольно-вертикальном сечении профиля (по середине стенки)

Из анализа результатов теоретических исследований следует важный для практики вывод – в черновых закрытых балочных калибрах прокатку необходимо вести с минимальным боковым обжатием фланцев ( $\eta_f$  не более 1,3), при котором имеет место наибольшее приращение их высоты. Формирование в первых проходах балочных профилей с достаточно высокими фланцами обеспечит их надежную высотную деформацию в чистовых контрольных калибрах и получение готовых двутавров со стабильными размерами по ширине полок. При этом должно соблюдаться условие  $\Delta b_o > \Delta b_z$ , обеспечивающее хорошее заполнение закрытых фланцев по всей длине раската.

Сравнение результатов расчета высотной деформации фланцев с помощью трехмерной конечно-элементной математической модели прокатки с экспериментальными данными [7] 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 %. Это вполне допустимо при проектировании калибровок валков для прокатки двутавровых профилей.

На основании проведенных исследований разработаны предложения по совершенствованию технологии прокатки и калибровок валков двутавровых балок № 14 по ГОСТ 8239-89 (категория Б, профили повышенной точности) на крупносортом 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 полок в зависимости от бокового обжатия фланцев профиля. Установлено, что с увеличением бокового обжатия фланцев приращение высоты фланцев уменьшается. Разработаны рекомендации по выбору рациональных соотношений бокового обжатия фланцев в черновых закрытых балочных калибрах.

**Анотація.** Наведено результати математичного моделювання течії металу в чорновому закритому балочному калібрі методом кінцевих елементів. Показано розподіл напружень, переміщень і деформацій у поперечному і поздовжньому перерізах профілю. Визначено інтегральні параметри формозміни - приріст висоти відкритих і закритих фланців і утягування висоти полиць залежно від бічного обтиснення фланців профілю. Встановлено, що зі збільшенням бічного обтиснення фланців приріст висоти відкритих і закритих фланців зменшується. Для отримання двутаврів підвищеної точності зі стабільними розмірами по ширині полиць чорнові закриті балкові калібри необхідно проектувати з мінімальним бічним обтисненням фланців, при якому в перших проходах можна отримати високі фланці і забезпечити їх надійну висотну деформацію в чистових контрольних калібрах. Рекомендується ці калібри проектувати з урахуванням середнього коефіцієнта деформації по товщині відкритих і закритих фланців не більше 1,3.

**Ключові слова:** балковий калібр, математична модель, деформація металу, бічне обтиснення фланців, приріст фланців.

**Abstract.** The results of mathematical modeling of metal flow in rough dead beam pass using finite elements method are given. Distribution of stresses, displacements and deformations in the transversal and longitudinal sections of the pass is shown. Integral parameters of the distortion particularly an increase of the height in open and dead flanges as well as pulling down the height of the flanges depending on side reduction of the pass flanges are determined. It is found out that with increase of flange side reduction the height increase of open and dead flanges is reduced.

For I-beams production with high accuracy with stable dimensions over the width of the flanges the rough dead beam passes must be designed with minimum side reduction of flanges whereby the first passes can provide high flanges and ensure reliable height deformation in fine control passes. It is recommended these calibers to be designed considering the average strain index  $\eta_l$  over thickness of open and dead flanges not more than 1.3.

**Keywords:** beam pass, mathematical model, deformation of metal, side reduction of flanges, increase of the flanges.

### Библиографический список использованной литературы

1. Лиханский В.С. Технология производства фасонных профилей с применением кассет / В.С. Лиханский, В.Н. Гринавцев. – М. : «Металлургия». – 1986. – 232 с.
2. Медведев В.С. Точность прокатки двутавровых балок в клетях дуо с использованием кассет с неприводными вертикальными валками / В.С. Медведев, А.А. Чичкан, В.А. Шпаков, Е.В. Базарова // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2014. – № 3. – С. 45–49.
3. 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.
4. 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»*. 36. наук. пр. Серія: Інформаційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – №43 (1086). – С. 81–88.
5. Медведев В.С. Влияние ширины стенки на изменение высоты фланцев в черновых закрытых балочных калибрах элементов / В.С. Медведев, Е.В. Базарова, В.А. Шпаков // *Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. Донбасской государственной машиностроительной академии*. – Краматорск : ДГМА. – 2015. – №1(40). – С. 175–181.
6. Боровик П.В. Теоретичні дослідження процесів обробки металів тиском на основі методу скінчених елементів: Навч. посіб. / П.В. Боровик. – Алчевськ : ДонДТУ. – 2012. – 170 с.
7. 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 : сб. наук. праць – Луганськ : вид-во СНУ ім. В. Даля*. – 2013. – № 1 (14). – С. 52–61.
8. Производство облегченных профилей / С.В. Макаев, И.Я. Винокуров, Б.В. Мерекин и др. – Свердловск: *Металлургиздат*, 1962. – 215 с.
9. Жадан В.Т. Производство двутавровых балок / В.Т. Жадан, Г.Д. Фейгин, И.М. Герман. – М. : *Металлургия*, 1972. – 192 с.

### References

1. Lihanskij, V.S. and Grinavcev, V.N. (1986), *Tehnologija proizvodstva fasonnyh profilej s primeneniem kasset*, Metallurgija, Moscow, Russian.
2. Medvedev, V.S., Chichkan, A.A., Shpakov, V.A. and Bazarova E.V. (2014), *Tochnost' prokatki dvutavrovyyh balok v kletjah duo s ispol'zovaniem kasset s neprivodnymi vertikal'nimi valkami*, Metallurgicheskaja i gornorudnaja promyshlennost', no 3, pp 45–49.
3. Medvedev, V.S., Borovik, P.V., Shpakov, V.A. and Bazarova, E.V. (2014), *Teoreticheskoe issledovanie techenija metalla v zakrytyh balochnyh kalibrah metodom konechnykh jelementov*, *Obrabotka materialov davleniem*, sb. nauch. tr, Donbasskoj gosudarstvennoj mashinostroitel'noj akademii, no 1 (38), DGMA, Kramatorsk, Russian, pp. 166–172.
4. Medvedev, V.S. Bazarova, E.V. and Shpakov, V.A. (2014), *Vlijanie obzhatija stenki na izmenenie vysoty flancev v chernovyh zakrytyh balochnyh kalibrah jelementov*, *Visnik Nacional'nogo tehničnogo universitetu «HPI»*, Zb. nauk. pr. Serija, Informacijni tehnologiji ta obladnannja obrobki materialiv u mashinobuduvanni ta metalurgiji, NTU «HPI»,. no 43 (1086), Harkiv, Ukraine, pp. 81–88,
5. Medvedev, V.S., Bazarova, E.V. and Shpakov, V.A. (2015), *Vlijanie shiriny stenki na izmenenie vysoty flancev v chernovyh zakrytyh balochnyh kalibrah jelementov*, *Obrabotka materialov davleniem*, sb. nauch. tr. *Donbasskoj gosudarstvennoj mashinostroitel'noj akademii*, no 1 (40), DGMA, Kramatorsk, Russian, pp. 175–181.
6. Borovik, P.V. (2012), *Teoretichni doslidzhennja procesiv obrobki metaliv tiskom na osnovi metodu skinchenih elementiv*, Navch. posib., DonDTU, Alchevs'k, Ukraine.
7. Medvedev, V.S., Shpakov, V.A. and Bazarova, E.V. (2013), *Jeksperimental'noe issledovanie techenija metalla v balochnyh kalibrah*, *Resursozberigajuchi tehnologiji virobництва ta obrobki tiskom materialiv u mashinobuduvanni*, *zb. nauk. prac', vid-vo SNU im. V. Dalja*, no 1 (14), Lugans'k, Ukraine, pp. 52–61.
8. Makaev, S.V., Vinokurov, I.Ja., Merekin, B.V. and dr. (1962), *Proizvodstvo oblegchennyh profilej*, Metallurgizdat, Sverdlovsk, Russian.
9. Zhadan, V.T., Fejgin, G.D. and German, I.M. (1972), *Proizvodstvo dvutavrovyyh balok*, Metallurgija, Moscow, Russian.

Подана до редакції 29.09.2015