

С. В. ЕРШОВ, С. Н. МЕЛЬНИК, Е. А. КРАВЧЕНКО

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА ПРИ ПРОКАТКЕ ШВЕЛЛЕРА В РАЗВЕРНУТОМ КАЛИБРЕ

Фланцевые профили широко применяются в промышленности. Многие вопросы, связанные с течением металла в калибре при прокатке фланцевых профилей, недостаточно изучены. На сегодня для решения задач ОМД широко применяются методы компьютерного моделирования. Статья содержит результаты сопоставления данных экспериментального и теоретического исследования формоизменения металла при прокатке швеллера в развернутом калибре на лабораторном стане 200. Показаны особенности изменения деформированного состояния металла по длине всего реального очага деформации.

Ключевые слова: деформация, швеллер, фланцы, развернутый калибр, формоизменение, моделирование.

Введение. На сегодняшний день в мире наблюдается тенденция увеличения выпуска фасонных профилей. Среди них важное место занимают фланцевые профили проката – рельсы, двутавровые балки, швеллеры и др. Они имеют сложную геометрическую форму, сочетающую в себе выступающие элементы поперечного сечения (фланцы), примыкающие друг к другу чаще всего под углом 90° . Особенность этих профилей в том, что их невозможно получить путем применения равномерных обжатий раската, а неизбежная неравномерность деформации приводит к сложному напряженно-деформированному состоянию металла.

Анализ последних исследований и литературы. Большой вклад в развитие и становление основ теории прокатки и калибровки прокатных валков внесен трудами В. Е. Грум-Гржимайло, А. П. Виноградова, А. П. Чекмарева, Д. И. Старченко, И. Я. Тарновского, Б. М. Илюковича, В. С. Смирнова, П. И. Полухина, Н. В. Литовченко и другими.

Исследования формоизменения и напряженно-деформированного состояния металла при прокатке швеллеров и других П-образных профилей проводились разными учеными [1–4]. Большая часть из них носит экспериментальный характер, посвящена изучению общих закономерностей и получению формул для расчета формоизменения металла.

Однако многие вопросы на сегодняшний день остаются недостаточно изученными. Расчет калибровок швеллеров и других фланцевых профилей весьма сложен. Для поиска оптимального решения проводится анализ большого числа возможных вариантов. Непрерывное возрастание требований к качеству готовой продукции заставляет искать пути совершенствования калибровки валков и улучшения технологии прокатки, что невозможно без учета реального напряженно-деформированного состояния металла в очаге деформации.

Сегодня эффективным инструментом для решения важных задач обработки металлов давлением стали компьютерные технологии. Выводы теоретических исследований успешно реализуют при разработке оптимальных режимов

деформации, конструировании оборудования и проектировании калибровок прокатных валков.

Важное место в проведении этих исследований занимают программные комплексы, созданные на базе метода конечных элементов (МКЭ) [5]. Их использование позволяет снизить затраты, связанные с созданием новых технологических процессов и оборудования с целью их последующей реализации в условиях промышленных предприятий. Конечно-элементные модели помогают в разработке новых и оптимизации используемых технологий прокатки и калибровок валков. Их применение позволяет с высокой точностью уже на стадии проектирования технологии сделать прогноз о ресурсо- и энергосберегающем эффекте от ее внедрения [6]. Еще одно важное преимущество – решение трудоемких задач исследования напряженно-деформированного состояния методами численного моделирования не требует проведения ресурсоемких и затратных экспериментов.

В области ОМД применяется ряд универсальных программных пакетов, которые позволяют определять энергосиловые параметры прокатки, формоизменение металла, поля деформаций и напряжений и т. д. Наиболее известные программы – ANSYS, LS-DYNA, DEFORM, QFORM, NASTRAN.

В связи со сказанным выше существует необходимость проведения ряда теоретических исследований деформированного и напряженного состояния при прокатке фланцевых профилей, получение математических зависимостей, которые учитывают весь комплекс факторов очага деформации для схем производства, реально используемых при прокатке.

Цель исследования, постановка проблемы.

Целью данной работы является: изучение течения металла по всей длине очага деформации во время прокатки; сопоставление экспериментальных и теоретических картин деформированного состояния металла при прокатке швеллера в развернутом калибре.

Материалы исследований. В работе [7] изложены опытные данные исследования формоизменения металла при прокатке швеллеров в калибрах развернутой формы на стане 200.

Матеріал прокатуваних образців – свинець. Експеримент проводився з використанням методу координатних сіток. На рис. 1 приведена використовувана схема поперечного сечення очага деформації. Оскільки очаг деформації

симметричний відносно вертикальної осі, то розглядаємо тільки його половину. Дані про формозміненні для п'яти образців приведені в табл. 1

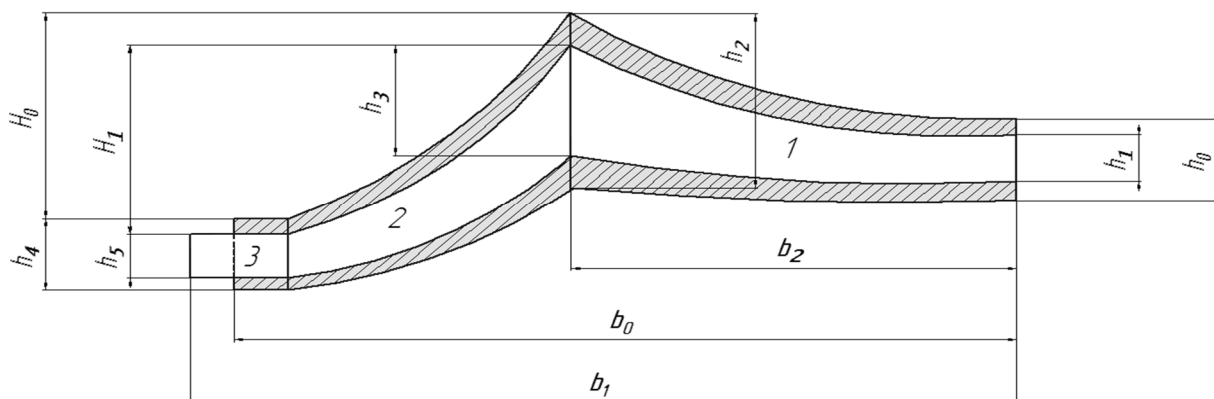


Рис. 1 – Поперечне сечення очага деформації в розвернутих калібрах при прокатці швеллерів

Таблиця 1 – Експериментальні дані про формозміненні при прокатці швеллерів в чорних розвернутих калібрах

№ обр.	Размер образца, мм									F ₀ , мм ²	λ _э
	2b ₀	h ₀	h ₂	h ₄	H ₁	2b ₁	h ₁	h ₃	h ₅		
1	94,7	16,67	16,67	16,67	10	96,1	12,2	12,2	12,2	1577,8	1,355
2	95,5	15,9	15,9	15,9	10	96,1	14,4	14,4	14,4	1510,1	1,086
3	100,3	16,8	16,8	16,8	10	101	11,9	11,9	11,9	1682,8	1,392
4	97,65	14,8	14,8	14,8	10	98,7	13,2	13,2	13,2	1446,7	1,115
5	92,9	14,7	14,7	14,7	10	94,5	11,9	11,9	11,9	1364,4	1,238

Дані експериментального дослідження прокатки швеллерів в розвернутих калібрах були промодельовані при допомозі програмного пакета *ESV Deform*, який дозволяє розраховувати параметри деформованого стану металу методом кінцевих елементів. При цьому для побудови сітки в якості кінцевих елементів можуть бути використані прямокутні призми або тетраедри. Загальна методика моделювання наведена в роботі [8].

Для теоретичного моделювання для порівняння з даними роботи [7] обрані наступні початкові дані: була використана прямокутна сітка, при цьому довжина кожної сторони прямокутника складала 1,3 мм; тип кінцевих елементів – прямокутна призма з 8 вузлами; діаметри валків по буртах – 200 мм; швидкість прокатки – 0,5 м/с; температура прокатки – 24°C. Розв'язок виконувався за методом штрафних функцій. На початковому етапі прийнято рівномірне розподілення температури по очагу деформації.

Результати дослідження. Порівняємо дані експерименту і теоретичного розрахунку. Визначимо похибку для ширини раската за наступною формулою:

$$\varepsilon_B = \frac{2b_{1э} - 2b_{1т}}{2b_{1э}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

де $2b_{1э}$, $2b_{1т}$ – загальна ширина раската за даними, отриманими експериментально і теоретично, мм.

Далі визначимо коефіцієнт витяжки теоретичного розрахунку за формулою:

$$\lambda_T = \frac{F_0}{F_1}, \quad (2)$$

де F_0 , F_1 – площа поперечного сечення раската до і після прокатки, мм².

Значення площей визначали за допомогою програми КОМПАС – 3D.

Похибку коефіцієнта витяжки визначали за формулою:

$$\varepsilon_\lambda = \frac{\lambda_\varepsilon - \lambda_T}{\lambda_\varepsilon - 1} \cdot 100\%. \quad (3)$$

Отримані розрахункові значення занесені в табл. 2. Порівняння величини ширини раската, отриманої для кожного з образців в результаті експериментального і теоретичного дослідження (табл. 2), показали, що найбільша похибка

расчета не превышает 2% и наблюдается по ширине третьего образца. Наименьшая погрешность 0,1% – по ширине четвертого свинцового образца. По вытяжке наибольшая величина погрешности

наблюдается для второго образца – 24,9%, наименьшая – 0,8% для третьего. Высокая степень совпадения по геометрии профиля свидетельствует об адекватности теоретической модели.

Таблица 2 – Сопоставление экспериментальных и теоретических данных

№ обр.	$2b_{1Э}$, мм	$2b_{1Т}$, мм	ϵ_b , %	$\lambda_{Э}$	F_1 , мм ²	λ_T	ϵ_{λ} , %	λ_p [7]	$\epsilon_{\lambda p}$, %
1	96,1	97,0	-0,9	1,355	1169,4	1,349	0,4	1,36	2,5
2	96,1	95,7	0,5	1,086	1355	1,114	-2,6	1,096	11,7
3	101	103,0	-1,9	1,392	1206,3	1,395	-0,2	0,367	2,1
4	98,7	98,8	-0,1	1,115	1298,8	1,114	0,1	0,113	8,6
5	94,5	95,3	-0,9	1,238	1111,3	1,228	0,8	1,222	-3,9
						Σ	6,56		5,76

В табл. 2 под λ_p записано значение коэффициента вытяжки, полученного авторами работы [7] в результате теоретического расчета. $\epsilon_{\lambda p}$ – погрешность коэффициента вытяжки для теоретического расчета в работе [7] по сравнению с экспериментальными данными. Как видим, суммарная погрешность коэффициента вытяжки теоретического расчета Σ в работе [7] почти на 1% ниже полученной при моделировании с помощью метода конечных элементов. Это можно объяснить лучшим учетом условий несжимаемости.

Ранее программный пакет ESV Deform уже применялся для расчета напряженно-деформированного состояния швеллеров при прокатке в развернутых калибрах.

Математическое моделирование было выполнено для прокатки в промышленных условиях.

На стане 350 ПАО «ДМКД» были отобраны недокаты швеллера, прокатанные в развернутых калибрах. С помощью профилографа вычерчены поперечные сечения раската по длине очага деформации. На основании полученных данных вычислялись коэффициент вытяжки по элементам раската и коэффициент уширения. Полученные данные по формоизменению швеллерной стали сравнивались с результатом теоретического моделирования. Подробная методика проведения исследований и полученные результаты для одного из раскатов изложены в работе [9]. На рис. 2 представлены фото двух недокатов и поперечные сечения раската, полученные в результате теоретического расчета, выполненного в программе ESV Deform. Для моделирования промышленной прокатки была использована тетраэдральная сетка.

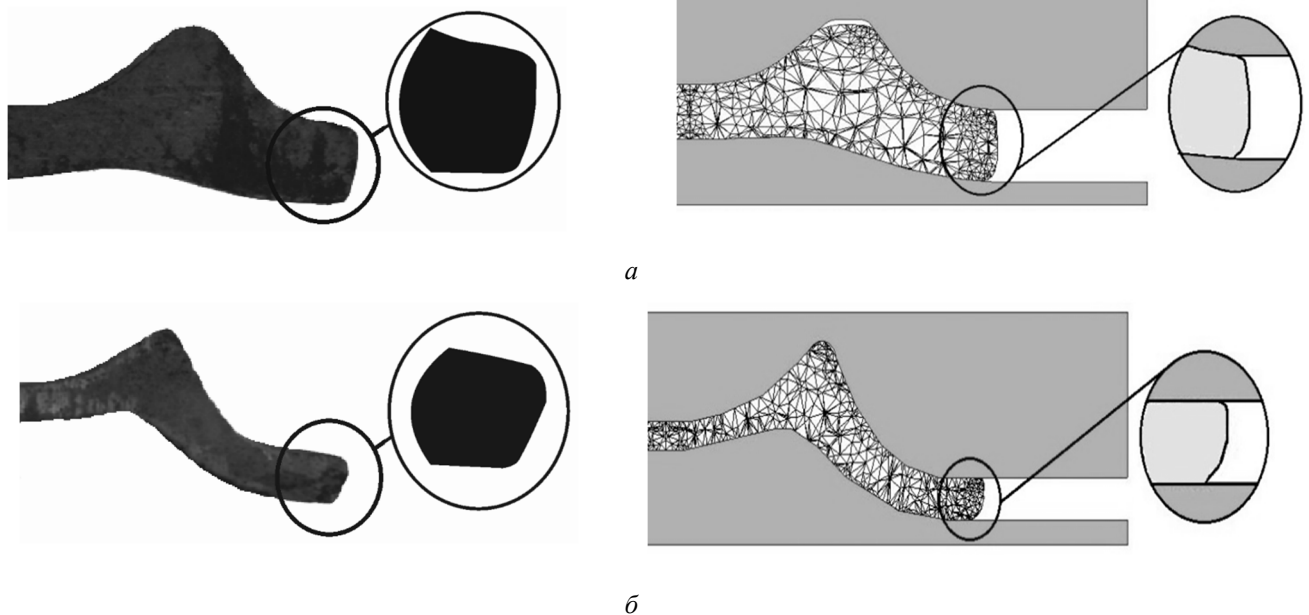


Рис. 2 – Фото и поперечное сечение раскатов при моделировании: а – для первого и б – второго недокатов

Сопоставление показало высокую точность расчета формоизменения металла. Как видим, даже форма фланцев на концах при прокатке в открытом калибре идентична той, которая была получена в

производственных условиях. Такая точность позволяет выявить многие тонкости процессов, происходящих в очаге деформации. Знание точной формы концов фланцев раската особенно важно для

разработки правильной формы и размеров контрольного калибра. Если форма фланцев рассчитана неточно и приводит к повышенному обжатию в закрытой части ручья, то, как правило, это влечет за собой повышенный износ контрольного калибра. Если контрольный калибр будет недостаточно обжимать фланцы, то высота полок на готовом профиле может выходить за пределы допусков – это брак. Также известно, что даже незначительные изменения формы раската, вызванные течением металла в калибре, могут сильно повлиять на напряженное состояние. Сравнение ширины недоката и конечной ширины при моделировании показало, что погрешность расчета для недоката на рис. 3, а составляет 0,8%, а для недоката на рис. 3, б – 1,5%.

Можно сделать вывод, что данные, полученные путем сравнения экспериментальных и промышленных прокаток с результатами математического моделирования, свидетельствуют о возможности использования теоретической модели для расчетов формоизменения и напряженного состояния швеллеров при их прокатке в развернутых калибрах. Это дает возможность по результатам теоретического расчета проанализировать поэтапно течение металла и деформированное состояние металла в очаге деформации.

Для выполнения анализа деформированного состояния металла выбираем четвертый образец, как образец с наименьшим значением погрешности (см. табл. 2). В результате расчета с использованием программного пакета ESV Deform был получен

трехмерный очаг деформации с внешними зонами. Для анализа были выбраны сечения в трех плоскостях – в момент касания полосы с валками, в середине и на выходе из очага деформации.

Результаты расчета в программе представлены в виде разноцветных полей, где разные цвета соответствуют определенным значениям скорости или напряжения. Для удобства визуального восприятия полученные поля были обработаны в программе КОМПАС – 3D (рис. 3–5).

Как показывают полученные поля, при прокатке в развернутом калибре имеет место выраженная неравномерность деформации. Течение металла по величине и направлению отличается в различных элементах раската. В плоскости входа в очаг деформации (рис. 3) контакт металла с нижним валком происходит раньше, чем с верхним. Этим объясняется то, что на участке стенки под действием обжатия со стороны нижнего ручья металл перетекает в ее верхнюю часть. Под действием сил нормального давления металл фланцев течет в направлении наименьшего сопротивления в сторону уширения, поскольку открытая форма калибра способствует свободному уширению раската.

Наибольшие значения скоростей продольного и поперечного перемещения металла наблюдаются по фланцам раската, постепенно уменьшаясь ближе к стенке. В высотном направлении более интенсивное перемещение происходит по стенке раската, где металл перетекает вверх вследствие начала обжатия со стороны нижнего ручья.

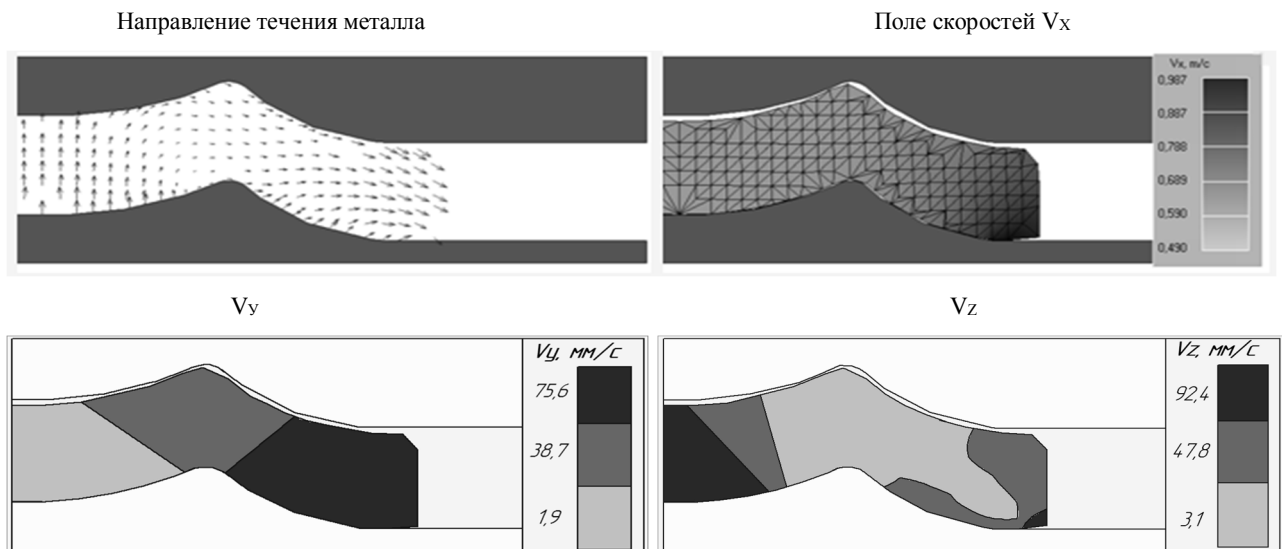


Рис. 3 – Течение металла и значения скоростей в плоскости входа в очаг деформации

Переходим к анализу деформированного состояния металла внутри очага деформации после контакта с валками всех частей раската (рис. 4).

Как видим, течение металла изменилось. Вследствие обжатия верхним и нижним валками металл на участке стенки равномерно перетекает в среднюю часть раската по направлению к горизонтальной оси. Вследствие интенсивного обжатия часть металла из стенки на участке ближе к горизонтальной оси калибра стремиться перетечь в

сторону уширения фланцев. Одновременно на концах фланцев большая интенсивность течения металла наблюдается по нижнему ручью калибра. На этом участке вследствие обжатия одна часть металла перетекает в сторону верхнего ручья, другая часть идет на уширение раската. Такая схема течения металла приводит к возникновению критического сечения А–В в средней части фланцев между наклонными участками калибра. Движение частиц металла, перетекающего из стенки во фланцы,

блокируется течением из нижней части фланцев в сторону верхнего ручья. В результате этого частички металла из стенки и фланцев, встречаясь друг с другом, меняют направление и перетекают в приконтактную зону фланцев в сторону нижнего ручья с левой стороны критического сечения, а с правой стороны наоборот – в сторону верхнего ручья.

Поле скоростей в продольном направлении качественно не изменилось по сравнению с сечением входа. Более высокая скорость наблюдается на концах фланцев, изменения значения скоростей происходят как раз по линии левее критического сечения А – В. В поперечном направлении полученное поле скоростей стало практически равномерным по всему раскату. Исключения составляют приконтактные зоны по фланцам раската, где скорость течения более интенсивна. Поле в высотном направлении также изменилось.

Поле скоростей во внутренних слоях металла равномерно, но численно имеет более низкие значения, чем на приконтактном слое. Количество зон с более высоким значением скорости V_z больше по верхнему ручью, чем по нижнему ручью калибра. Такое течение металла в поперечном и высотном направлениях вызвано различными условиями для перетекания частиц металла в верхнем и нижнем приконтактном слоях, которые объясняются формой калибра. Вогнутая форма рабочего участка нижнего ручья калибра затрудняет течение металла на этом участке. Одновременно по верхнему ручью калибра на выпуклых участках условия, в частности для уширения раската, более благоприятные. В продольном и поперечном направлениях наблюдается численное увеличение скоростей перемещения частиц металла.

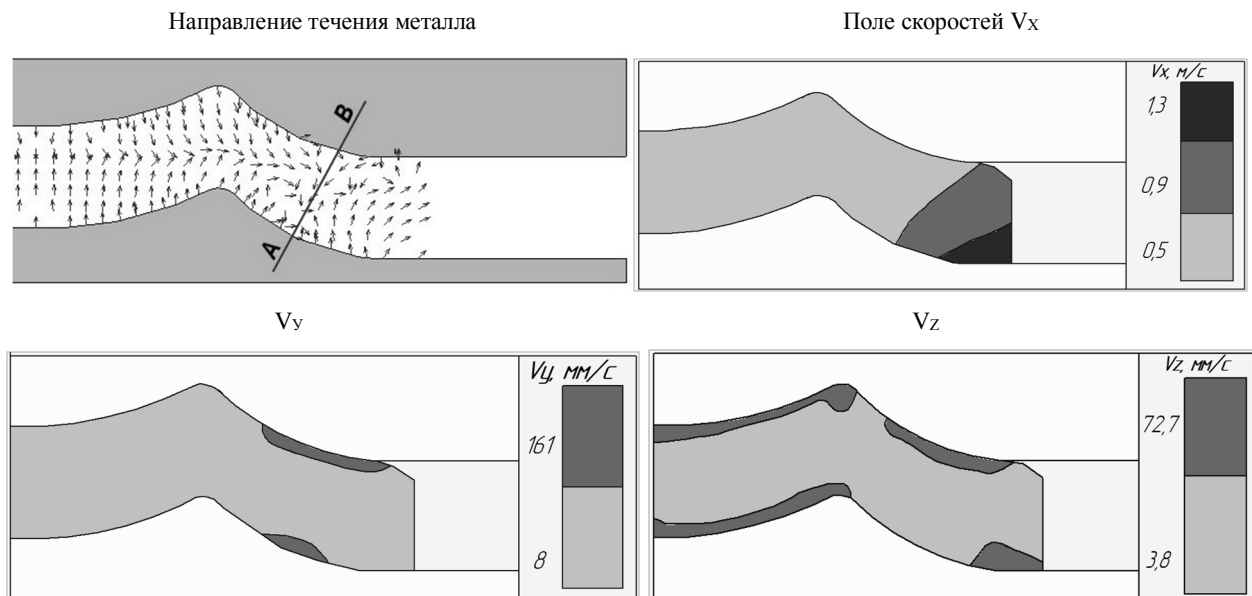


Рис. 4 – Течение металла и значения скоростей в плоскости в средней части очага деформации

Проанализируем третье сечение – участок перед выходом из очага деформации, расположенный на вертикальной оси валков (рис. 5).

Течение металла по стенке сохранило свое направление – металл на концах фланцев со стороны нижнего ручья по-прежнему стремится перетечь в верхнюю часть калибра на уширение фланцев вверх и в сторону стенки. Однако оттуда он продолжает вытесняться частичками металла, которые движутся из стенки во фланцы. Вследствие этого часть металла фланцев со стороны наклонной части верхнего ручья перетекает вниз по направлению к наклонному участку нижнего ручья калибра. Это приводит к некоторой утяжке верхней части фланцев на концах и их большему уширению со стороны нижнего ручья. Расположение критического сечения А–В не изменилось.

Скорость перемещения металла в продольном направлении по фланцам, как и прежде, имеет более высокие численные значения, что связано с интенсивным обжатием металла в этом элементе раската. Линия, по которой изменяются численные

значения продольной скорости, проходит вдоль критического сечения А – В. В поперечном и высотном направлениях также более высокие числовые значения скоростей, по сравнению с остальными участками, наблюдаются на концах фланцев ближе к нижнему ручью калибра. Это способствует тому, что фланцы со стороны нижнего ручья больше уширяются в сторону края калибра. Скорость перемещения металла в высотном направлении V_z стала равномерной в приконтактных и внутренних слоях. Других качественных изменений скорости перемещения в поперечном направлении металла по сравнению с предыдущим сечением не наблюдается. Лишь незначительно увеличилась площадь зон с численно более высокой скоростью. В высотном направлении скорость перемещения по стенке металла выровнялась и стала равномерной. При этом по фланцам разность скоростей во внутреннем и приконтактном слоях сохранилась. Также можно заметить численное снижение скоростей. Это вызвано уменьшением степени обжатия раската по мере приближения к вертикальной оси валков.

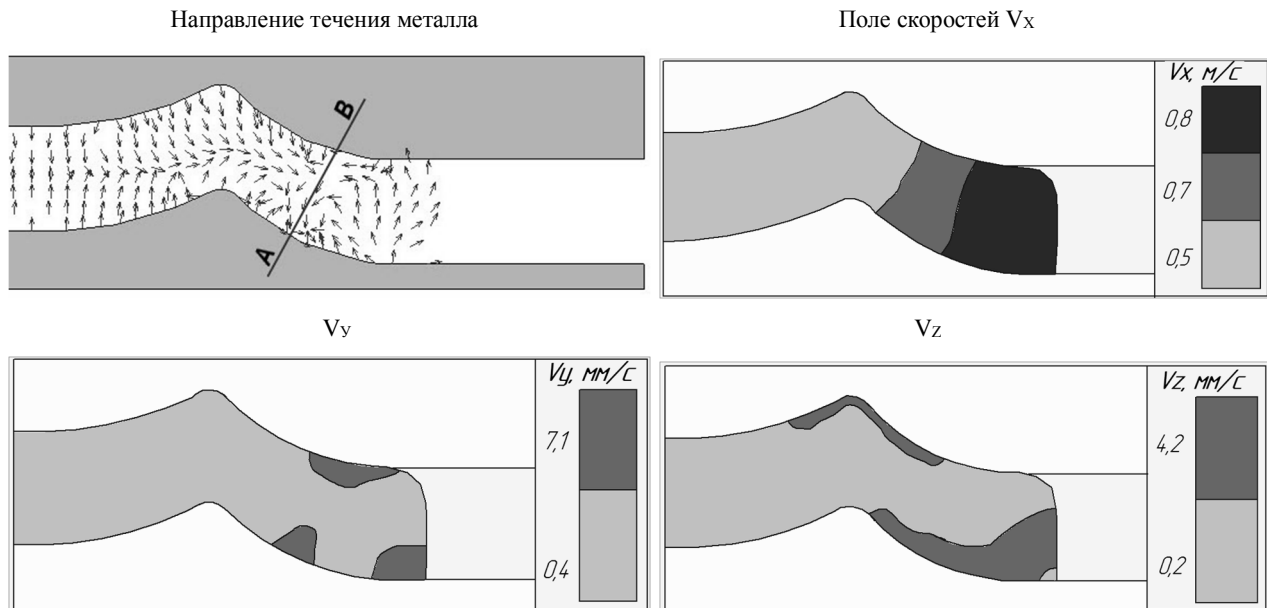


Рис. 5 – Течение металла и значения скоростей в плоскости выхода из очага деформации

Следует отметить, что в работе [7] авторами не было выявлено критическое сечение А – В. В анализе деформации и поля скоростей отсутствуют данные расчетной ширины раската после прокатки. Из этого можно предположить, что полученные в результате расчета значения для ширины раската имели значительную погрешность по сравнению с экспериментальными данными. Такое расхождение числовых значениях могло быть вызвано тем, что при расчетах не учли критическое сечение. Можно предположить, что наблюдаемая схема течения металла по фланцам приведет к сложному напряженному состоянию металла. Это сечение может стать местом развития высоких напряжений с разными знаками.

Существует необходимость анализа не только напряженного состояния, но и скоростей скольжения металла на наклонных участках калибра. Есть вероятность того, что более высокая скорость перемещения металла в области критического сечения А – В и высокие контактные напряжения могут привести к повышенному износу калибра на рассматриваемом участке.

Выводы. Статья содержит результаты сравнения экспериментального и теоретического исследования деформированного состояния металла при прокатке швеллерной стали в развернутом калибре на стане 200. Сопоставление показало адекватность расчетной модели и подтвердило возможность ее использования для исследования деформации металла и процессов, протекающих в очаге деформации при прокатке данного вида профилей. Установлено, что деформированное состояние раската изменяется по мере прохождения очага деформации. Характер течения металла по фланцам и наличие критического сечения на этом участке могут значительно повлиять на напряженное состояние металла и привести к смене знака

напряжений по элементам раската. Выявленные особенности деформации могут быть использованы при проектировании и усовершенствовании действующих калибровок валков. Существует необходимость изучения напряженного состояния в рассматриваемом калибре, что требует проведения дальнейших исследований.

Список литературы: 1. Старченко Д. И. Исследование характера деформации при прокатке в швеллерных калибрах / Д. И. Старченко, А. В. Сидоренко // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 1969. – №8. – С. 95–98. 2. Клименко В. М. Исследование деформации и распределения обжатий между валками при прокатке П-образной заготовки в закрытом ящичном калибре / В. М. Клименко, Л. Н. Лесик, В. В. Моисеев [и др.] // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 1987. – №12. – С. 49–51. 3. Луцкий М. Б. Особенности методики расчета калибров П-образных профилей с растяжением боковых стенок / М. Б. Луцкий, А. А. Чичкан, В. А. Луценко [и др.] // Бюллетень «Черная металлургия». – 2007. – №6. – С. 55–59. 4. Нехаев Н. Е. Исследование деформации и энергосиловых параметров при прокатке П-образных профилей в четырехвалковых калибрах // Н. Е. Нехаев, М. К. Измайлова // Обработка металлов давлением. – 2011. – №3 (28). – С. 171–176. 5. Карамышев А. П. Моделирование процессов обработки металлов давлением в Deform – 3D с целью рационального построения технологических процессов / А. П. Карамышев, И. И. Неврасов, В. С. Паршин [и др.] // Металлург. – 2012. – №2. – С. 53–55. 6. Чумаченко Е. Н. Математическое моделирование и энергосбережение при прокатке в калибрах / Е. Н. Чумаченко, С. А. Аксенов, И. В. Логашина // Металлург. – 2010. – №8. – С. 34–37. 7. Тарновский И. Я. Элементы теории прокатки сложных профилей / И. Я. Тарновский, А. Н. Скороходов, Б. М. Илюкович. – М.: «Металлургия», 1972. – 352 с. 8. Еришов С. В. Развитие теории напряженно-деформированного состояния металла при прокатке крупных круглых профилей с пониженным трещинообразованием в системах сортовых калибров: дис. на соискание научной степени докт. техн. наук: 05.03.05 / Еришов Сергей Владимирович. – Днепропетровск, 2008. – 339 с. 9. Еришов С. В. Экспериментальное и теоретическое исследование деформированного состояния металла при прокатке швеллера / С. В. Еришов, С. Н. Мельник, К. Г. Геймур, Е. А. Кравченко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2014. – №43 (1086). – С. 31–39.

Bibliography (transliterated): 1. Starchenko D. I. and A. V. Sidorenko. "Issledovanie haraktera deformacii pri prokatke v shvellernih kalibrah". *Izvestiya VUZov: Chernaya Metallurgiya*. No. 3. 1969. 95–98. Print. 2. Klimenko V. M., L. N. Lesik and V. V. Moiseenkov. "Issledovanie formoizmenenija i raspredelenija obzhatij mezhdv valkami pri prokatke P-obraznoj zagotovki v zakrytom jashhichnom kalibre". *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgija*. No. 12. 1987. 49–51. Print. 3. Luckij M. B., A. A. Chichkan and V. A. Lucenko [et al.]. "Osobennosti metodiki rascheta kalibrov P-obraznyh profilej s rastjazheniem bokovyh stenok". *Bjulleten' «Chernaja metallurgija»*. No. 6. 2007. 55–59. Print. 4. Nehaev N. E. and M. K. Izmajlova. "Issledovanie formoizmenenija i jenergosilovyh parametrov pri prokatke P-obraznyh profilej v chetyrehvalkovykh kalibrah". *Obrabotka metallov davleniem*. No. 3. 2011 (28). 171–176. Print. 5. Karamyshev A. P., I. I. Nevrasov and V. S. Parshin [et al.]. Modelirovanie processov obrabotki metallov davleniem v Deform-3D

s cel'ju racional'nogo postroenija tehnologicheskikh processov. *Metallurg*. No. 2. 2012. 53–55. Print. 6. Chumachenko E. N., S. A. Aksenov and I. V. Logashina. Matematicheskoe modelirovanie i energosberezenie pri prokatke v kalibrah. *Metallurg*. №8. 2010. 34–37. Print. 7. Tarnovskiy I. Ya., A. N. Skorohodov and B. M. Ilyukovich. Elementy teorii prokatki slozhnyh profilej. Moskva: Metallurgija, 1972. Print. 8. Ershov S. V. *Razvitie teorii naprijazhenno-deformirovannogo sostojanija metalla pri prokatke krupnyh kruglyh profilej s ponizhennym treshhinoobrazovaniem v sistemah sortovyh kalibrov*: dis. na soiskanie nauchnoj stepeni dokt. tehn. nauk: 05.03.05. Dneprodzerzhinsk, 2008. 339. Print. 9. Ershov S. V., S. N. Mel'nik, K. G. Gejmur and E. A. Kravchenko. Eksperimental'noe i teoreticheskoe issledovanie deformirovannogo sostojanija metalla pri prokatke shvellera. *Visnik Nacional'nogo tehničnogo universitetu «KhPI»*. Serija: Innovacijni tehnologii ta obladnannja obrobki materialiv u mashinobuduvanni ta metalurgii. Kharkiv: NTU «KhPI». No. 43 (1086). 2014. 31–39. Print.

Поступила (received) 27.10. 2015

Сведения об авторах / About the Authors

Ершов Сергей Владимирович, доктор технических наук, профессор, Днепродзержинский государственный технический университет, заведующий кафедрой ОМД, тел. (0569) 55-11-98.

Мельник Сергей Николаевич, кандидат технических наук, ПАО «Днепровский металлургический комбинат им. Ф. Э. Дзержинского», главный калибровщик, тел. (0569) 398-25.

Кравченко Екатерина Александровна, Днепродзержинский государственный технический университет, аспирант, тел. (0569) 57-40-47, e-mail: katarina088@gmail.com.

Ershov Sergey Vladimirovich, Ph.D., professor, Dneprodzerzhinsk State Technical University, Head of the Department of Metal forming, tel. (0569) 55-11-98.

Mel'nik Sergey Nikolaevich, Ph.D., PJSC «Dnieper Metallurgical Plant them. Dzerzhinsky», Chief calibrator, tel. (0569) 398-25.

Kravchenko Ekaterina Aleksandrovna, Dneprodzerzhinsk State Technical University, Postgraduate student, tel. (0569) 57-40-47, e-mail: katarina088@gmail.com.