

УДК 621.771.01

Ершов С. В.
Мельник С. Н.
Геймур К. Г.
Кравченко Е. А.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ПРОКАТКЕ ШВЕЛЛЕРА

Фланцевыми профилями называют такие профили, оси отдельных элементов которых расположены под некоторым углом к соединяющей их части [1]. Чаще всего этот угол равняется 90° . К профилям данного типа относятся двутавровые и колонные балки, швеллеры, тавры, рельсы и другие профили. Также к ним можно отнести шпунтовые сваи корытной формы и профили для железнодорожных шпал. Эта продукция нашла широкое применение в промышленности – машиностроении, строительстве, вагоностроении, автомобильной промышленности и других отраслях.

Швеллером называется корытообразный профиль, состоящий из стенки (шейки) и двух полок (фланцев). Производство швеллеров осуществляют в основном из углеродистой стали обыкновенного качества и низколегированной стали [2]. Прокатывают их на сортовых и рельсобалочных станах в зависимости от профилеразмера готового профиля, особенностей конструкции станом [3].

К особенностям прокатки любого фланцевого профиля можно отнести то, что его невозможно получить из заготовки или слитка прямоугольного сечения при равномерных обжатиях. Как правило, наибольшее формоизменение с неравномерностью деформации по элементам профиля осуществляется в первых проходах – когда у раската более высокая температура и металл наиболее пластичен [1]. При прокатке в последующих калибрах стремятся применять обжатия, обеспечивающие относительное равенство вытяжек по всем элементам профиля. В противном случае в металле могут иметь место значительные внутренние напряжения, которые приведут к образованию поверхностных дефектов готовой продукции.

Ко второй особенности прокатки фланцевых профилей относится боковое обжатие отдельных участков раската (фланцев). Эффективно деформировать сравнительно высокие и тонкие фланцы, возможно только в калибрах специальной конструкции, которая обеспечивает с применением значительных боковых обжатий уменьшать толщину фланцев и в то же время предупреждать их утяжку. Наиболее эффективно боковое обжатие выполнять с применением калибров, в которых обжатие фланцев производится разными валками.

Неравномерность деформации по элементам профиля приводит к их различной вытяжке и как следствие к созданию сложного напряжённого состояния в прокатываемом раскате. Однако вследствие взаимосвязи течения металла в раскате и действия внешних концов полосы на очаг деформации в процессе прокатки происходит выравнивание удлинения всех элементов [4]. Все участки раската приобретают общее суммарное значение вытяжки $\lambda_{общ}$. При этом элемент с большей вытяжкой будет подвержен действию отрицательных сжимающих напряжений. В то же время, на элементы с меньшей вытяжкой будут действовать продольные растягивающие напряжения. Получаемое значение $\lambda_{общ}$ является результатом кинематического и силового взаимодействия элементов с различной вытяжкой.

Еще два десятилетия назад большая часть исследований носила экспериментальный характер, теперь же с развитием ЭВМ теоретические исследования приобретают все большую популярность. Появилась возможность изучать процессы, протекающие внутри очага деформации, что дает возможность более детального изучения процесса формоизменения металла и создает благоприятные условия для развития теории прокатки.

Как известно, требования к качеству готовой продукции металлургических предприятий непрерывно возрастают. При этом, не смотря на большое количество исследований, вопросы деформационного состояния металла при прокатке в калибрах сложной конфигурации недо-

статочны изучены по сегодняшний день. Это можно объяснить высокими темпами развития производственных технологий и большим количеством факторов, влияющих на качество получаемого профиля. Успешное совершенствование калибровки валков невозможно без детального изучения напряженно-деформированного состояния и течения металла в калибре.

В производственных условиях изучение напряженного состояния, возникающего при прокатке металла, трудноосуществимо. Отсутствует методика экспресс анализа, которую можно было бы применить для сложных фасонных профилей.

Целью работы является выбор методики для определения предварительного напряженного состояния в условиях производства, изучение напряженного состояния металла в калибре, используемом при прокатке швеллеров на среднесортном стане, и установление реальной картины распределения знаков поперечных напряжений внутри очага деформации с внешними зонами.

При проведении экспериментальных исследований со стана 350 ПАО «ДМКД» отобраны образцы швеллера после прокатки. Исследуемый раскат был взят из девятой клетки. Размеры калибра и заготовки приведены на рис. 1.

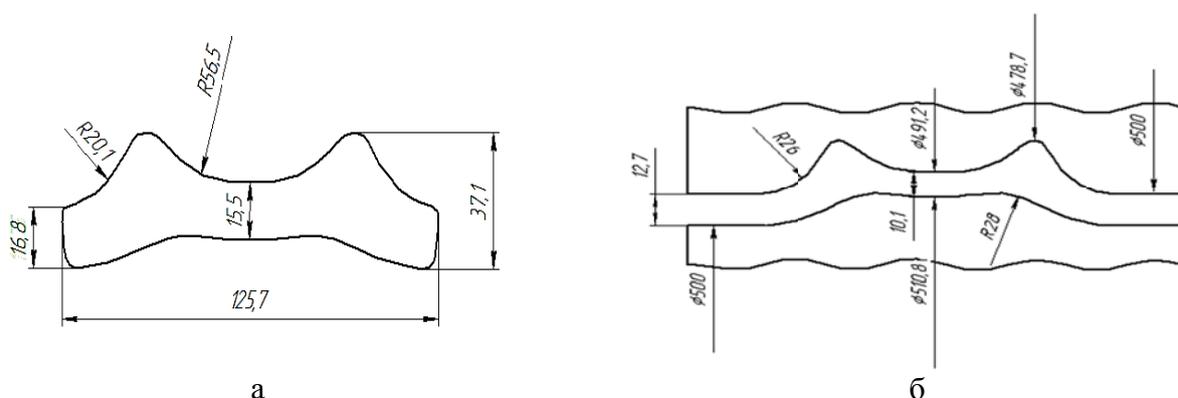


Рис. 1. Размеры формообразующего калибра (а), форма и размеры заготовки (б)

Очаг деформации по длине был разбит на 13 участков, равноудаленных друг от друга. Методика снятия размеров поперечных сечений раската по всему очагу деформации, результаты экспериментального и теоретического расчета деформированного состояния приведены в работе [5]. В этой же работе путем сравнения с экспериментальными данными была доказана адекватность расчетной теоретической модели.

Теоретический расчёт выполнялся с использованием программного пакета ESV Deform, который подробно описан в работе [6]. В состав пакета входят следующие программы: 1) ESV Graf – графический редактор, который позволяет начертить сечение заготовки и калибра; 2) ESV Deform – программа на основе метода конечных элементов, выполняющая непосредственно расчёт, 3) ESV Automation – программа, которая позволяет автоматизировать работу, а в случае надобности выполнить большое количество расчётов. В качестве математического аппарата в ESV Deform используются метод конечных элементов и принципы механики сплошных сред.

Для исследования напряженного состояния при прокатке швеллера в очаге деформации, раскат был разделен на элементы следующим образом (рис. 2).

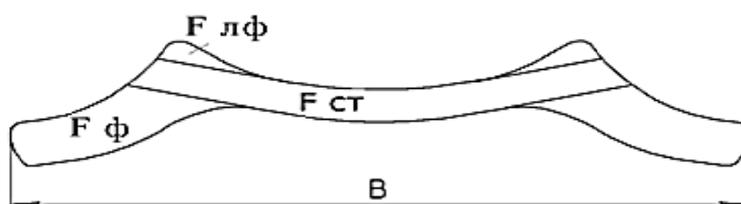


Рис. 2. Схема разбивки раската на участки

Для экспериментального исследования влияния схемы деформации на напряженное состояние металла были выбраны две методики. При этом было принято допущение, что в раскате, подаваемом из предыдущей восьмой клетки, отсутствует напряженное состояние. Напряжения возникают при прокатке в исследуемой клетке.

При использовании первой выполняется сравнение общего коэффициента вытяжки по профилю с коэффициентами частичных удлинений по элементам раската. Расчеты для каждого из сечений выполнялись с использованием величин площадей поперечных сечений по следующим формулам:

$$\lambda_{\text{общи } i} = \frac{F_0}{F_i}, \quad (1)$$

где $\lambda_{\text{общи } i}$ – общий коэффициент вытяжки на исследуемом участке;

F_0 – начальная площадь раската, мм²;

F_i – площадь исследуемого участка в сечении очага деформации i , мм².

$$\lambda_{\text{лфи}}^* = \frac{F_{\text{лфи}^{i-1}}}{F_{\text{лфи}}}, \quad \lambda_{\text{сми}}^* = \frac{F_{\text{сми}^{i-1}}}{F_{\text{сми}}}, \quad \lambda_{\text{фи}}^* = \frac{F_{\text{фи}^{i-1}}}{F_{\text{фи}}}, \quad (2)$$

где $\lambda_{\text{лфи}}^*$, $\lambda_{\text{сми}}^*$, $\lambda_{\text{фи}}^*$ – коэффициенты частных удлинений по элементам раската.

По второй методике изменение знаков поперечных напряжений внутри очага деформации определялось сравнением общего коэффициента удлинения раската в поперечном сечении с коэффициентами удлинений по элементам раската в этом же сечении очага деформации. Общий коэффициент вытяжки на одном участке определялся следующим образом:

$$\lambda_{\text{общи } i+1}^* = \frac{F_i}{F_{i+1}}, \quad (3)$$

где $\lambda_{\text{общи } i+1}^*$ – коэффициент удлинения раската в данном сечении;

F_{i+1} – площадь сечения в следующем, после исследуемого, сечении, мм².

Данные измерений и расчета по сечениям раската приведены в табл. 1.

По итогам расчета построены графические зависимости. При их построении принято, что если значение частного коэффициента вытяжки по одному из элементов превышает общее значение вытяжки на участке или по всему профилю, то по всему участку в исследуемом сечении будут преобладать сжимающие напряжения. Эти зоны показаны со знаком «-». Если же общий коэффициент вытяжки больше, чем вытяжка по элементу раската, то в поперечном сечении этого элемента будут преобладать растягивающие напряжения. Такие зоны обозначены знаком «+».

Под количеством напряжений в статье понимается площадь зон, занятая этими напряжениями на каждом из элементов профиля.

Данные полученные при использовании первой методики, приведены на рис. 3, второй – на рис. 4. Сечение 1 соответствует входу полосы в очаг деформации, сечение 3 – контакту с валками всех частей раската, сечение 10 – вертикальной оси валков, сечение 13 – выходу из очага деформации.

Из графиков видна значительная неравномерность распределения знаков напряжений в очаге деформации при прокатке профиля в исследуемом калибре. Данные, полученные с использованием двух методик, имеют существенные различия.

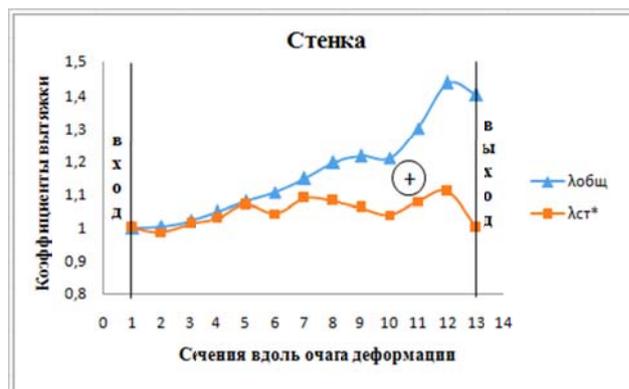
Так в соответствии с первой методикой (рис. 3, а), можно сделать вывод, что в начале очага деформации по ложным фланцам наблюдаются сжимающие напряжения, которые затем переходят в растягивающие.

Согласно данным, полученных по второй методике (рис. 4, а), в ложных фланцах развиваются сжимающие напряжения, которые после выхода за пределы вертикальной оси валков переходят в растягивающие.

Таблица 1

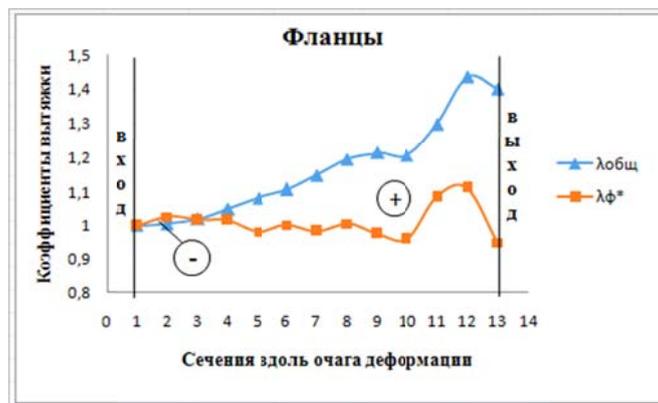
Расчетные значения по элементам раската

| № сечения | $F_{лф}, \text{мм}^2$ | $F_{ст}, \text{мм}^2$ | $F_{ф}, \text{мм}^2$ | $F_{общ}, \text{мм}^2$ | $\lambda_{общ}$ | $\lambda_{лф}^*$ | $\lambda_{ст}^*$ | $\lambda_{ф}^*$ | $\lambda_{общ}^*$ |
|-----------|-----------------------|-----------------------|----------------------|------------------------|-----------------|------------------|------------------|-----------------|-------------------|
| 1 | 153,3 | 1 365,1 | 1 118,3 | 2 636,7 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 149,7 | 1 383,1 | 1 090,3 | 2 623,1 | 1,005 | 1,024 | 0,987 | 1,026 | 1,005 |
| 3 | 146,4 | 1 365,9 | 1 072,5 | 2 584,8 | 1,020 | 1,023 | 1,013 | 1,017 | 1,015 |
| 4 | 130,4 | 1 328,8 | 1 056,6 | 2 515,8 | 1,048 | 1,123 | 1,028 | 1,015 | 1,027 |
| 5 | 121 | 1 242,7 | 1 075,9 | 2 439,6 | 1,081 | 1,078 | 1,069 | 0,982 | 1,031 |
| 6 | 116,6 | 1 192,5 | 1 073,9 | 2 383 | 1,106 | 1,038 | 1,042 | 1,002 | 1,024 |
| 7 | 109,6 | 1 095,4 | 1 092,6 | 2 297,6 | 1,148 | 1,064 | 1,089 | 0,983 | 1,037 |
| 8 | 103,8 | 1 013,8 | 1 087,2 | 2 204,8 | 1,196 | 1,056 | 1,080 | 1,005 | 1,042 |
| 9 | 98,8 | 955,8 | 1 115,5 | 2 170,1 | 1,215 | 1,051 | 1,061 | 0,975 | 1,016 |
| 10 | 101,4 | 919,6 | 1 161,6 | 2 182,6 | 1,208 | 0,974 | 1,039 | 0,960 | 0,994 |
| 11 | 103,7 | 852,3 | 1 071,7 | 2 027,7 | 1,300 | 0,978 | 1,079 | 1,084 | 1,076 |
| 12 | 100,2 | 768,6 | 965,6 | 1 834,4 | 1,437 | 1,035 | 1,109 | 1,110 | 1,105 |
| 13 | 95 | 768,3 | 1 016,4 | 1 879,7 | 1,403 | 1,055 | 1,000 | 0,950 | 0,976 |



а

б



в



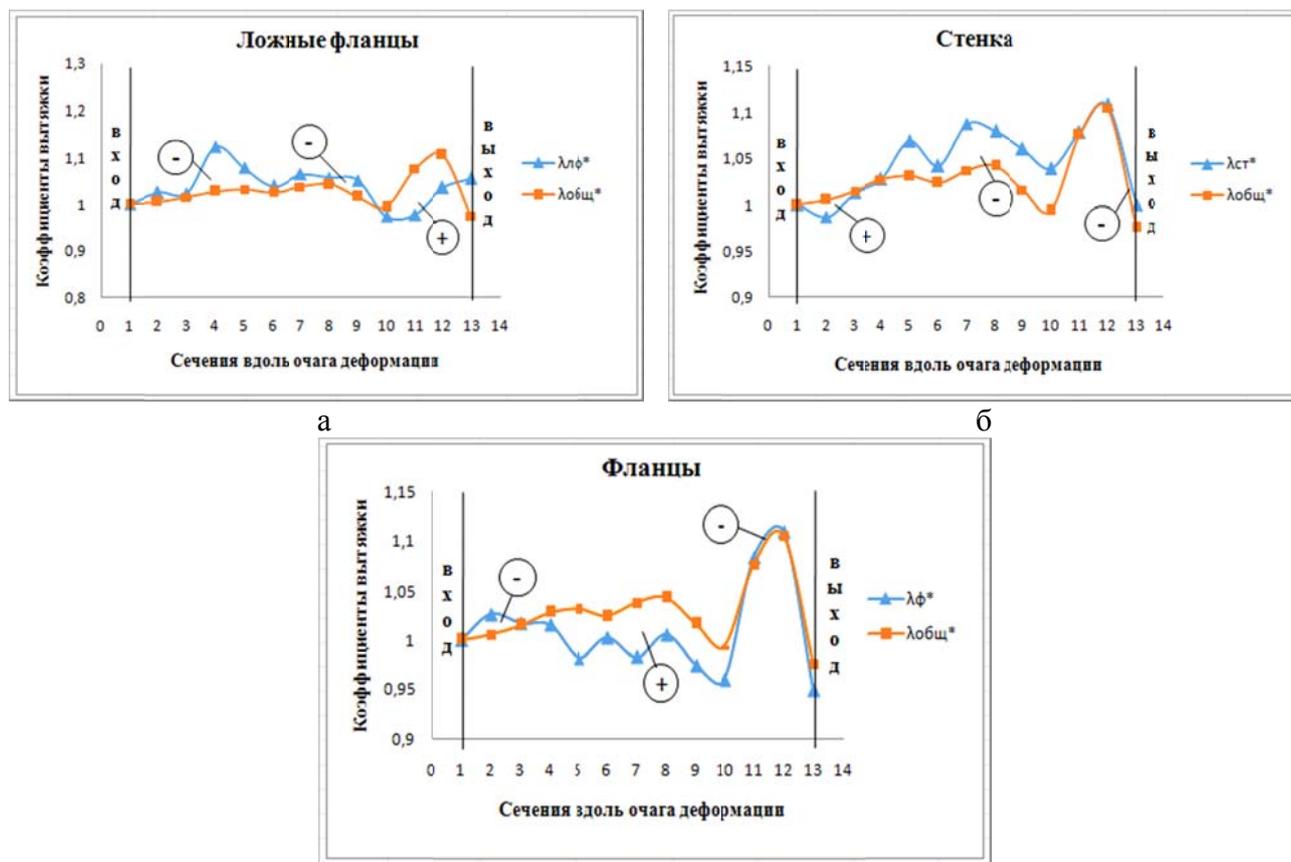
– сжимающие напряжения;



– растягивающие напряжения

Рис. 3. Вытяжки и напряжения (методика 1):

а – напряженное состояние ложных фланцев; б – стенки; в – истинных фланцев



○⁻ – сжимающие напряжения; ○⁺ – растягивающие напряжения

Рис. 4. Вытяжки и напряжения (методика 2):

а – напряженное состояние ложных фланцев; б – стенки; в – истинных фланцев

По стенке профиля в соответствии с первой методикой наблюдаются постоянно возрастающие растягивающие напряжения (рис. 3, б). На основании результатов, полученных по второй методике (рис. 4, б), следует, что растягивающие напряжения переходят в сжимающие напряжения, после контакта всех частей раската с валками. При выходе раската за пределы вертикальной оси валков видим, что обе кривые на графиках практически совпадают, что свидетельствует о приблизительном равенстве количества сжимающих и растягивающих напряжений.

В соответствии с первой и второй методиками, анализ истинных фланцев показал, что сжимающие напряжения переходят в растягивающие напряжения после контакта всех частей раската с валками. При этом в соответствии с первой методикой наблюдается возрастание растягивающих напряжений (рис. 3, в), а по второй методике (рис. 4, в) за пределами вертикальной оси валков перед выходом из очага деформации начинается незначительное преобладание сжимающих напряжений.

Для проверки предложенных методик экспресс анализа напряженного состояния сравним результаты, приведенные на рис. 3 и 4, с теоретическим расчётом. Полученные значения напряжений в трех поперечных сечениях профиля – на входе в очаг деформации (сечение № 1 – 2), за 10 мм от вертикальной оси валков (сечение № 8 – 9) и перед выходом из очага деформации (сечение № 11 – 12) приведены на рис. 5. На этих рисунках видна неравномерность распределения знаков напряжений по длине очага деформации, при этом в каждом из элементов профиля имеют место как сжимающие, так и растягивающие напряжения.

Ложные фланцы. На рис. 5, а видно, что в начале очага деформации по ложным фланцам преобладают сжимающие отрицательные напряжения (занимают 75 % их площади). По мере продвижения по очагу деформации, за 10 мм до вертикальной оси валков (рис. 5, б) – количе-

ство зон с растягивающими напряжениями постепенно возрастает, однако, их все еще меньше половины (~40 %). Перед выходом из очага деформации видим преобладание растягивающих напряжений (60 %). Сравнивая эти данные с построенными графиками по первой методике (рис. 3, а), видим их совпадение в начале очага деформации, но по мере продвижения металла по очагу деформации ситуация изменяется – первая методика показывает значительное преобладание растягивающих напряжений, в то время как на рис. 5, б больше сжимающих напряжений. То есть, их вид отличается. На выходе из очага деформации вновь наблюдается совпадение с результатами, полученными с использованием первой методики. Обратившись к данным полученным по второй методике (рис. 4, а) видим полное совпадение экспериментальных и теоретических расчетов.

Стенка. По стенке профиля наблюдается распределение напряжений, схожее с ложными фланцами – количество зон с растягивающими напряжениями увеличивается по мере продвижения вдоль очага деформации (от 35 до 80 %). Методика 1 (рис. 3, б) имеет отличия от данных теоретического расчёта – знаки напряжений совпадают только в последнем сечении (перед выходом металла из очага деформации). Сравнивая данные со второй методикой (рис. 4, б), видим, что здесь также есть несовпадения – в средней части очага деформации методика 2 показывает преобладание растягивающих напряжений, в то время как теоретический расчёт показал на этом участке большее количество сжимающих напряжений.

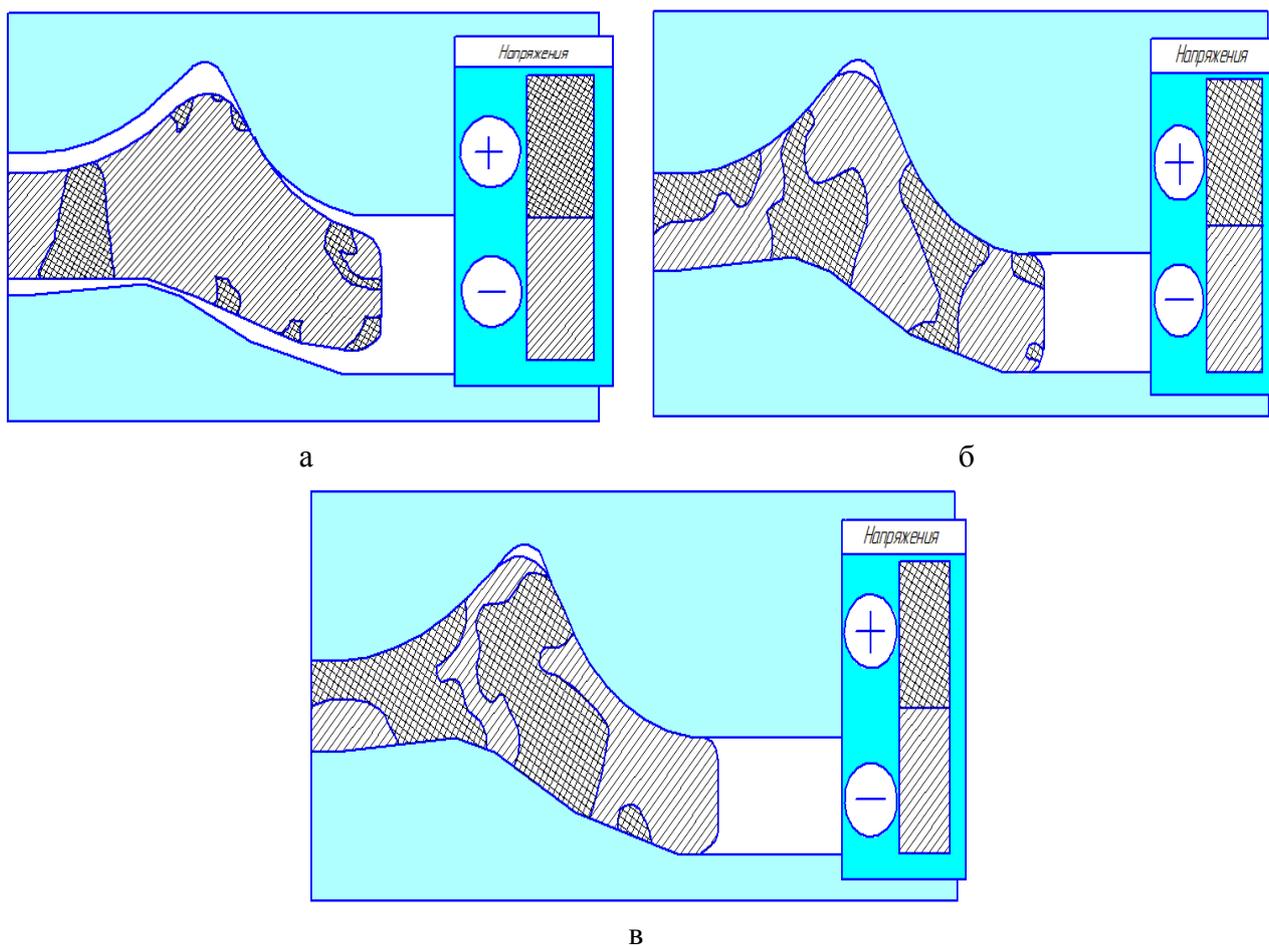


Рис. 5. Схема напряженного состояния на входе в очаг деформации (сечение 1 – 2) (а), в очаге деформации за 10 мм до вертикальной оси валков (сечение 8 – 9) (б), перед выходом из очага деформации (сечение 11 – 12)

Фланцы. Количество растягивающих напряжений в этой зоне в начале очага деформации незначительно (20 %). Внутри очага деформации их количество увеличивается и доходит до 40 % на расстоянии 10 мм перед вертикальной осью валков и 45 % за ее преде-

лами перед выходом из очага деформации, но на этом участке по-прежнему преобладают сжимающие напряжения. Сравнивая эти данные с экспресс методиками 1 и 2, видим совпадение в начале очага деформации (рис. 3, в и 4, в). Далее следует полное несовпадение данных с первой методикой. Вторая методика также показала различные результаты внутри очага деформации, однако перед выходом из очага деформации и по второй методике, и по теоретическому расчёту наблюдаются незначительное преобладание сжимающих напряжений.

Сложная картина напряжённого состояния объясняется разновременностью и неравномерным обжатием элементов профиля в очаге деформации. На участках, где происходит более интенсивное обжатие, наблюдаются сжимающие напряжения. К примеру, если рассмотреть стенку в сечении входа в очаг деформации (рис. 5, а), видим, что первой в контакт с валками вступила наружная наклонная часть гребня верхнего вала. Напряжения на этом участке сжимающие. На соседнем участке ложных фланцев, который вытягивается вслед за обжимаемым участком стенки, наблюдаются растягивающие напряжения. Если смотреть по контуру нижнего вала, то следующими в контакт вступят фланцы со стороны наклонной выпуклой части. Там также наблюдаются сжимающие напряжения. При этом на соседних с ними не обжимаемых участках стенки и на концах фланцев видим растягивающие напряжения.

Рассмотрев сечение в очаге деформации (рис. 5, б), видим, что наиболее интенсивное обжатие происходит по вершинам ложных фланцев, на двух участках по фланцам расположенных со стороны верхнего и нижнего вала и по стенке со стороны нижнего ручья. На остальных участках видим растягивающие напряжения.

В сечении перед выходом из очага деформации (рис. 5, в) сжимающие напряжения наблюдаются по стенке со стороны нижнего ручья, на концах фланцев, по основанию ложных фланцев, в местах перехода стенки во фланцы со стороны нижнего вала.

Из всего вышеизложенного следует, что первая экспериментальная методика определения напряжённого состояния (рис. 3) даёт совпадение с теоретическим расчётом приблизительно на 42 %, что делает методику непригодной для дальнейшего использования из-за высокой погрешности. Данные, полученные по второй методике (рис. 4), совпадают с теоретическими расчётами на 65 %. Это означает, что она пригодна для использования на производстве с целью быстрой предварительной оценки напряжённого состояния.

ВЫВОДЫ

Расчет выполнен для условий прокатки в калибре девятой клетки, используемом для производства швеллера на среднесортном стане 350 ПАО «ДМКД». Были получены данные по качественному распределению реальных напряжений в поперечном направлении по всему очагу деформации. Приведенные графические зависимости и данные теоретического расчета свидетельствуют о значительной неравномерности распределения знаков поперечных напряжений при прокатке данного профиля. При наличии концентраторов напряжений и других отрицательных факторов технологического характера это может привести к нарушению сплошности профиля и образованию поверхностных дефектов. Для приближенного определения знака напряжений в очаге деформации подходит применение второй методики. Первая методика непригодна по причине высокого процента погрешности. Более детальное изучение напряжённого состояния исследуемого профиля требует сопоставления теоретических исследований по определению напряжённого состояния металла и данных по распределению скоростей течения металла внутри очага деформации.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Илюкович Б. М. Прокатка и калибровка: справочник в 6 т. – Днепропетровск : РВА «Дніпро-вал». – 2004. – Т. 5 : Калибровка швеллерообразных и корытообразных профилей / Б. М. Илюкович, Н. Е. Нехаев, В. П. Капелюшный. – 2004. – 481 с.*
2. *Смирнов В. К. Калибровка прокатных валков / В. К. Смирнов, В. А. Шилов, Ю. В. Инатович – М. : «Теплотехник», 2010. – 490 с.*

3. Грудев А. П. *Технология прокатного производства: учебник для ВУЗов* / А. П. Грудев, Л. Ф. Машкин, М. И. Ханин. – М.: «Металлургия», 1994. – 656 с.
4. Данченко В. М. *Теорія процесів обробки металів тиском: підручник* / В. М. Данченко, В. О Гринкевич, О. М. Головка. – Дніпропетровськ: Пороги, 2008. – 370 с.
5. *Экспериментальное и теоретическое исследование деформированного состояния металла при прокатке швеллера* / С. В. Ершов, 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 Збірник наукових праць.* – 2014. – № 43 (1086). – С. 31–39.
6. Ершов С. В. *Развитие теории напряженно-деформированного состояния металла при прокатке крупных круглых профилей с пониженным трещинообразованием в системах сортовых калибров: диссертация на соискание ученой степени доктор технических наук: 05.03.05* / С. В. Ершов – Днепродзержинск, 2008. – 339 с.

REFERENCES

1. Iljukovich B. M. *Prokatka i kalibrovka: spravochnik v 6 t. – Dnepropetrovsk: RVA «Dnipro-val».* – 2004. – Т. 5: *Kalibrovka shvelleroobraznyh i korytoobraznyh profilej* / В. М. Iljukovich, N. E. Nehaev, V. P. Kapeljushnyj. – 2004. – 481 s.
2. Smirnov V. K. *Kalibrovka prokatnyh valkov* / V. K. Smirnov, V. A. Shilov, Ju. V. Inatovich – М.: «Teplotehnik», 2010. – 490 s.
3. Grudev A. P. *Tehnologija prokatnog proizvodstva: uchebnik dlja VUZov* / A. P. Grudev, L. F. Mashkin, M. I. Hanin. – М.: «Metallurgija», 1994. – 656 s.
4. Danchenko V. M. *Teorija procesiv obrobki metaliv tiskom: pidruchnik* / V. M. Danchenko, V. O Grinkevich, O. M. Golovko. – Dnipropetrovs'k: Porogi, 2008. – 370 s.
5. *Jeksperimental'noe i teoreticheskoe issledovanie deformirovannogo sostojanija metalla pri prokatke shvellera* / S. V. Ershov, S. N. Mel'nik, K. G. Gejmur, E. A. Kravchenko // *Visnik Nacional'nogo tehnicnogo universitetu «HPI». Serija: Innovacijni tehnologii ta obladnannja obrobki materialiv u mashino-buduvanni ta metalurgii Zbirnik naukovih prac'.* – 2014. – № 43 (1086). – S. 31–39.
6. Ershov S. V. *Razvitie teorii naprjazhenno-deformirovannogo sostojanija metalla pri prokatke krupnyh kruglyh profilej s ponizhennym treshhinoobrazovanijem v sistemah sortovyh kalibrov: dissertacija na soiskanie uchenoj stepeni doktor tehniceskikh nauk: 05.03.05* / S. V. Ershov – Dneprodzержinsk, 2008. – 339 s.

Ершов С. В. – д-р техн. наук, проф. ДГТУ
Мельник С. Н. – канд. техн. наук, гл. калибровщик ПАО «ДМКД»
Геймур К. Г. – начальник сортопрокатного цеха ПАО «ДМКД»
Кравченко Е. А. – аспирант ДГТУ

ДГТУ – Днепродзержинский государственный технический университет, г. Днепро-дзержинск;

ПАО «ДМКД» – Публичное акционерное общество «Днепровский металлургический комбинат им. Ф. Э. Дзержинского», г. Днепродзержинск.

E-mail: katarina088@gmail.com