

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА ПРИ ПРОКАТКЕ В СОРТОВОМ КАЛИБРЕ

У статті проведено зіставлення експериментальних та теоретичних епюр швидкостей і напружень. Показано, що при тонкому аналізі перебігу металу експериментальні методи можуть давати похибку, тому доречно у таких випадках використовувати теоретичні методи досліджень. Також зазначено, що при прокатуванні в овальних калібрах та на гладкій бочці виникає пік швидкості прокольної течії металу поряд з бічними поверхнями смуги. Така схема розподілення швидкості призводить до виникнення прокольних розтягуючих напружень на бічних поверхнях та в осьовій зоні.

The article compares the theoretical and experimental plots of speeds and voltages. Shown that when a thin metal flow analysis experimental techniques may give an error, so it is appropriate in such cases, the use of theoretical research methods. It is also marked that at rolling in oval calibers and on a smooth barrel there is a peak of speed of flow of puncture of metal next to the sides of bar. Such chart of distributing of speed results in the origin of stretchings tensions of puncture on sides and in an axial area.

Значительная часть выплавляемого металла подвергается прокатному переделу в сортовых прокатных цехах. Таким способом получают продукцию, которая затем используется в строительных конструкциях различных сооружений. Часть сортовой продукции, как правило сложного сечения, используется в качестве заготовки для деталей машин и механизмов. Поэтому вопросы качества, относящиеся к сортопрокатному производству, имеют большое значение для многих отраслей промышленности.

Решение вопросов качества возможно разными путями. Одним из путей является совершенствование режимов деформации с целью предупреждения схем, приводящих к возникновению опасных для целостности металла напряжений. Данный вопрос давно интересовал и производителей, и теоретиков прокатного производства. Яркими примерами работ, посвященных экспериментальному исследованию дефектообразования, и причин, приводящих к этому, являются работы Чижикова Ю.М. и Дзугутова М.Я. Более поздние исследования, например работы Полухина П.И. с соавторами, использовали уже не только экспериментальный подход, но и теоретический. В этих работах на основе анализа полей деформаций или скоростей рассчитывались и напряжения в объеме обрабатываемого материала. Это был качественный скачок в методах анализа, который показал, что сложные процессы могут быть исследованы с достаточно высокой точностью и информативностью полученных результатов.

Однако эти исследования показали и ограниченность используемых подходов. Первым выявленным недостатком была длительность и трудоемкость проведения экспериментов. В результате исследованиям подверглись лишь отдельные группы профилей, что не позволяет систематизировать полученные теоретические знания и распространить их на всю гамму форм калибров, используемых в сортопрокатном производстве. Вторым выявленным недостатком было понимание того, что для получения адекватных результатов требовалась высокая точность проведения эксперимента. Только в этом случае дифференцирование, необходимое для расчета напряжений, не приводит к возникновению погрешностей, которые могут быть причиной не только занижения или завышения величин напряжений, но и могут приводить к смене знака напряжений.

Выходом из сложившейся ситуации может стать использование современных численных методов определения напряжений и деформаций, изложенных в работах [1 и 2]. Можно считать, что более удобным является метод конечных элементов. Он позволяет получать непрерывные в объеме деформируемого тела поля деформаций, скоростей и напряжений. Однако и здесь существуют серьезные трудности. Перечисление проблем, мешающих точному решению, можно делать долго и это не входит в цель данной работы. Вместе с тем интересным является сопоставление данных экспериментальных исследований с данными теоретических расчетов с целью выявления моментов нестыковок и установления правдоподобной картины напряженно-деформированного состояния, на основе логического анализа наблюдаемых полей деформаций, скоростей и напряжений.

Целями работы являются:

1. Расчет напряженно-деформированного состояния при прокатке квадратной заготовки в овальном калибре;
2. Сопоставление эпюр скоростей и напряжений, полученных экспериментально и эпюр, построенных на основе теоретических расчетов;
3. Анализ причин отклонения результатов теоретических расчетов от результатов экспериментальных исследований.

Исследование основано на использовании метода конечных элементов и результатов экспериментов по прокатке в овальном калибре, опубликованных в работе [3, стр. 268-290].

Для расчета деформированного состояния использовано вариационное уравнение

$$\delta \left[\frac{1}{2} \int_V \mu H^2 dV - \int_S \sigma_\tau v_\tau dS + t_1 \int_V \varepsilon_0^2 dV + t_2 \int_S (v_n - \omega_n)^2 dS \right] = 0$$

где μ - условная вязкость металла ($\mu = \frac{\tau_s}{H_{it-1}}$); H - интенсивность скоростей деформации сдвига; σ_τ и v_τ - полное напряжение трения и скорость скольжения металла по поверхности инструмента S ; t_1 - штрафная константа на невыполнение условия несжимаемости; $\varepsilon_0 = \frac{1}{3}(\xi_x + \xi_y + \xi_z)$ - скорость относительного изменения объема; t_2 - штрафная константа на невыполнение условия непроницаемости; v_n - проекция скорости течения металла в данной точке контактной поверхности на нормаль к поверхности в этой точке; ω_n - проекция скорости движения инструмента на нормаль к поверхности контакта в данной точке.

Напряженное состояние рассчитывалось в соответствии с методикой, опубликованной в работе [4] адаптированной для метода конечных элементов в работе [5]. Достаточная для практики точность методики расчета напряженного состояния металла подтверждена в работе [6].

При анализе использовали схему деформации (рис. 1), приведенную в работе [3]. Моделировали прокатку с неравномерным температурным полем, полученным в результате решения задачи теплопроводности. Исходная температура равна 1065°C . Количество оборотов валков принималось равным 8,5 об/мин. Обжатие по вершине калибра – 24 мм.

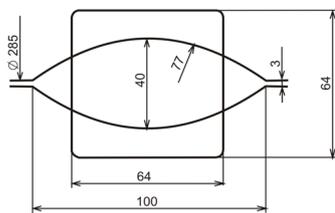


Рис. 1. Схема деформации при прокатке в овальном калибре

Анализ полученных результатов.

Разделим очаг деформации в продольном направлении на две части. Границей раздела примем точку равенства всех скоростей продольного течения металла. В сечении, с координатами $x = 58$ мм происходит первый контакт углов раската с поверхностью калибра. В сечении с координатой $x = 47$ мм в контакт с валком вступает средняя по ширине раската часть. Плоскость выхода полосы из валков соответствует координате $x = 0$.

Результаты сравнения эпюр скоростей продольного течения металла v_x , полученных экспериментально в работе [3] с эпюрами, полученными в результате расчета, показывают (рис. 2), что общий характер изменения скоростей продольного перемещения частиц металла практически одинаков.

Характерным является то, что в первой части очага деформации скорость движения точек 21 и 25 на поверхности полосы больше скорости движения точек 1 и 5. Однако имеются некоторые отличия в соотношении скоростей отдельных участков поперечного сечения полосы. Экспериментальные эпюры показывают, что в первой части очага деформации скорость движения точки 1 больше скорости движения точки 5 в начале очага деформации (правда разница величин этих скоростей на рисунке практически не различима). Только после вступления заготовки в контакт с валками скорость точки 1 становится меньше скорости точки 5. Теоретические эпюры говорят об обратном – скорость движения точки 5 больше скорости движения точки 1 на всем протяжении деформирования в первой части очага. Здесь разница тоже незначительна, но хорошо различима.

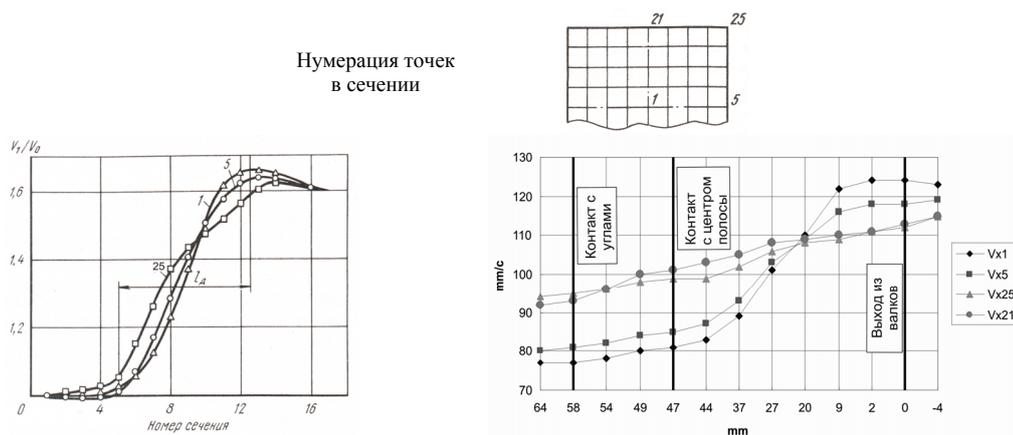


Рис. 2. Экспериментальные и теоретические эпюры, характеризующие скорости продольного течения металла v_x

Какой же вариант более полно отражает процессы, происходящие в очаге деформации с логической точки зрения?

В этой части очага деформации первоначальный контакт полосы с валками наступает в углах заготовки. Значит, обжатие углов приводит к перемещению металла в вертикальной и горизонтальной плоскости и деформации соседних участков полосы. Ближним к обжимаемому участку является участок боковой поверхности (точка 5), так как построенный прямоугольный треугольник с вершинами в точках 1, 5, 25 показывает, что расстояние от точки 25 (угол полосы) до точки 1 (продольная ось раската) измеряется по гипотенузе, а от точки 25 до точки 5 (боковая поверхность) по катету. Отсюда

следует, что более обжимаемым участком должен быть участок с точкой 5, а, следовательно, и скорость его перемещения должна быть большей. Это говорит о том, что эпюра, полученная теоретически, позволяет четче выделить тонкости взаимодействия между отдельными участками полосы. По всей видимости, проведение даже высокоточного эксперимента, такого как в работе [3], не всегда позволяет уловить малую разность в изменении характера деформации при сложном течении металла.

К сожалению, в работе [3] не показана эпюра скорости перемещения точки 21, соответствующая середине горизонтальной поверхности полосы. Это не позволяет оценить точность экспериментального определения соотношения скоростей точек 21 и 25. Теоретические эпюры показывают, что до контакта углов полосы с валками скорость точки 25 (угол) больше скорости точки 21 (середина). После начала обжатия углов скорость продольного перемещения точки 25 замедляется за счет эффекта вытеснения металла против хода прокатки, но v_x не меняет знак на обратный. И это при том, что анализ эпюр вертикальной составляющей v_z четко показывает значительную разность в обжатии участка с точкой 25. Скорость продольного перемещения точки 21 продолжает увеличиваться за счет взаимодействия с участками полосы по ходу очага деформации, которые стягивают участок с точкой 21 в валки. В результате скорость движения точки 21 остается большей до второй части очага деформации, когда дальнейшему росту скорости этой точки начинают препятствовать контактные силы трения, направленные во второй части очага против хода прокатки.

Во второй части очага деформации характер изменения экспериментальных и теоретических эпюр скоростей полностью одинаков и показывает, что скорость перемещения точки 1 больше скорости перемещения точки 5 и больше скорости перемещения точки 25. Точки 21 и 25 движутся с одинаковой скоростью.

Анализ данных по напряженному состоянию показал наличие больших различий в характере напряженного состояния между экспериментальными и теоретическими данными. Хотя он показал и много общего. Экспериментальные и расчетные данные представлены на рис. 3.

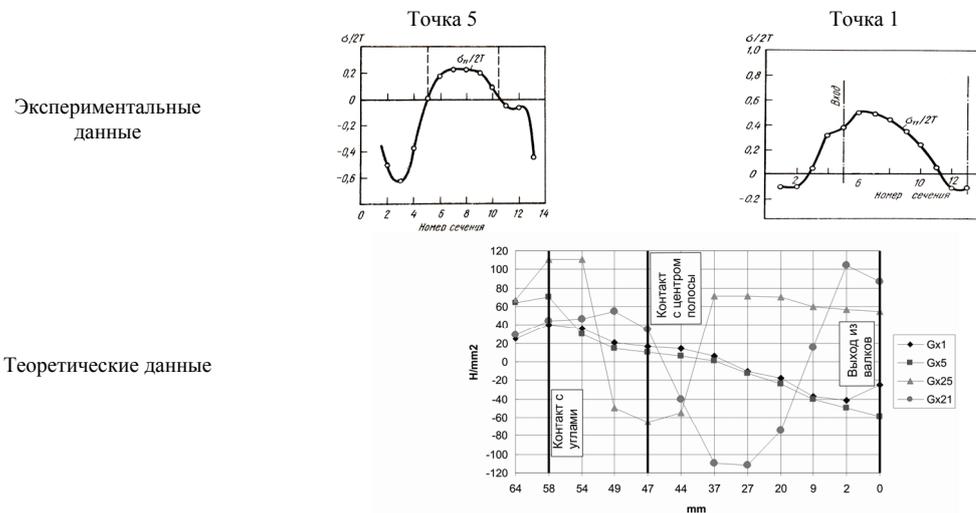


Рис. 3. Экспериментальные и теоретические эпюры, характеризующие продольные напряжения

Так, анализ напряженного состояния в области точки 21 и в эксперименте, и в теории говорит о наличии продольных растягивающих напряжений в первой части очага деформации за счет разницы скоростей продольного течения участков с точками 21 и 25. Однако отсутствие экспериментальных сравнительных эпюр для участков 21 и 25 не позволяет оценить развитие напряжений на протяжении всего очага деформации. Теоретические данные позволяют дополнить этот пробел и показывают, что в участке с точкой 21 растягивающие напряжения переходят в сжимающие только после контакта этой части полосы с валками (рис. 3).

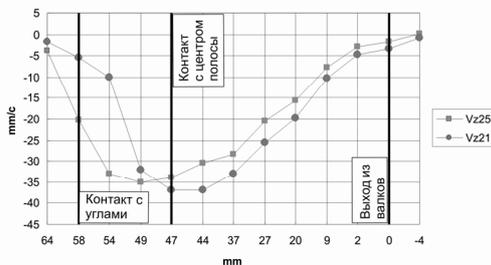


Рис. 4. Изменение скорости вертикального перемещения v_z вдоль очага деформации

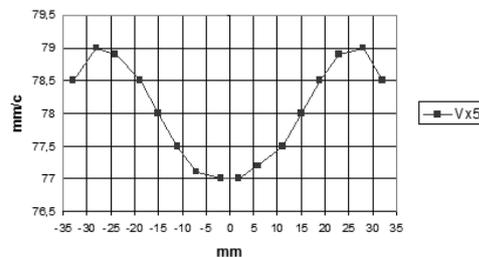


Рис. 5. Изменение продольной скорости v_x по ширине полосы

Здесь сжимающие напряжения примерно во второй трети очага деформации опять становятся растягивающими, но уже не за счет разности скоростей между серединой контактной поверхности и углами, а за счет разницы скоростей между поверхностью полосы и ее центральными участками. Так как это и положено для низких очагов деформации [7].

Рассматриваемый процесс проходит при $\ell_d/h_{cp} = 1.1$. В участке, содержащем точку 25, картина развития продольных напряжений несколько иная. Здесь тоже после начала обжатия угловых участков растягивающие напряжения переходят в сжимающие. Однако дальнейшее более интенсивное обжатие средней части полосы (точка 21), которое видно из анализа эпюры v_z (рис. 4), приводит к вытягиванию угловых участков и формированию в них продольных растягивающих напряжений на оставшейся до выхода из валков части очага деформации. Отсутствие экспериментальных эпюр напряжений для углового участка по всей вероятности связано с большой деформацией этого участка и значительными искажениями экспериментальной сетки на образце, не позволившим сделать расчеты.

Анализ экспериментальных эпюр продольных напряжений в точках 1 (ось раската) и 5 (боковая поверхность вблизи горизонтальной плоскости) показывает, что в точке 5 до касания полосы с валками действуют продольные сжимающие напряжения, а после касания – растягивающие. В точке 1 сначала действуют небольшие продольные сжимающие напряжения, а затем растягивающие, которые переходят в сжимающие практически перед выходом из очага деформации. Теоретический анализ показывает другую картину. До касания полосы с валками и в точке 1, и в точке 5 действуют продольные растягивающие напряжения, которые через определенное расстояние после вступления в контакт с валком всей горизонтальной поверхности полосы становятся сжимающими и остаются такими до выхода за осевую плоскость валков.

Вообще наличие сжимающих продольных напряжений в осевой части раската при прокатке низких полос хорошо известно и было получено авторами данной работы теоретически при проверке адекватности моделирования напряженного состояния в работе [6]. Это убеждает, что появление растягивающих напряжений в осевой части раската до входа полосы в валки связано не с особенностями методики расчета, а с особенностями течения металла в условиях неравномерной деформации. Причем, ранее была показана идентичность расчетных и экспериментальных данных по соотношению скоростей течения металла между поверхностными и центральными участками раската. Причина такого вида напряженного состояния заключается в том, что при прокатке с неравномерным обжатием по ширине рассмотрение эпюр только в каком либо одном сечении или в одной плоскости не позволяет сделать полный анализ картины течения металла, а следовательно и напряжений. В нашем случае возникновение растягивающих напряжений в точках 1 и 5 связано с тем, что металл, смещаемый в угловых участках по направлению к центру заготовки, приводит к формированию рядом с боковой поверхностью полосы вертикального участка с повышенной скоростью продольного течения (рис. 5).

Естественно, что этот участок увлекает за собой метал зон с точками 1 и 5, вызывая в этих зонах появление растягивающих напряжений. Разница в скоростях между зонами небольшая (2 мм/с), но действие происходит на узком участке, что дает большие градиенты относительных удлинений ξ_{xx} , которые являются производными от поля скоростей. Это и приводит к возникновению небольших, порядка 20 МПа, растягивающих напряжений. По мере продвижения по очагу деформации картина течения становится более равномерной и описанный эффект пропадает. В результате наблюдается классическая схема напряженного состояния в очаге деформации для низких полос со сжимающими продольными напряжениями по всему поперечному сечению полосы.

Таким образом, приходим к выводу, что экспериментальные эпюры отразили лишь часть информации. Растягивающие напряжения в очаге деформации действительно есть, но они не распространяются на всю длину очага после контакта полосы с валками, а присутствуют только на некотором расстоянии после входа полосы в валки. Экспериментально этот факт, по-видимому, установить очень сложно, так для его выявления необходима очень мелкая сетка и очень высокая точность измерений, которая, скорее всего, экспериментально не достижима.

Выводы.

Сопоставление экспериментальных и теоретических эпюр скоростей и напряжений показало, что при тонком анализе течения металла экспериментальные методы могут давать погрешность, связанную с трудностью проведения высокоточных экспериментов, выявляющих высокие градиенты изменения скоростей.

Для тонкого анализа течения металла и особенно напряжений более пригодны теоретические методы исследований без упрощения схемы деформации и других упрощающих допущений, которые заглубляют картину течения металла.

Прокатка в овальных калибрах сопровождается возникновением пика скорости продольного течения металла рядом с боковыми поверхностями полосы. Этот пик отсутствует при прокатке на гладкой бочке. Такая схема распределения скорости приводит к возникновению продольных растягивающих напряжений на боковых поверхностях и в осевой зоне.

Список литературы

1. Теоретические основы обработки металлов давлением: в 2 т. / Б. М. Илюкович, А. П. Огурцов, Н. Е. Нехаев, С. В. Ершов. – Днепропетровск: РИА "Днепро-ВАЛ", 2001–2002. – Т. 1. – 2001. – 518 с.
2. Компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением. Численные методы / В. Н. Данченко, А. А. Миленин, В. И. Кузьменко, В. А. Гринкевич. – Днепропетровск: Системные технологии, 2005. – 445 с.
3. Воронцов В. К. Экспериментальные методы механики деформируемых твердых тел / В. К. Воронцов, П. И. Полухин, В. А. Белевитин, В. В. Бринза. - М.: Metallurgia, 1990. - 480 с.
4. Полухин П. И. Деформации и напряжения при обработке металлов давлением. Применение метода муар и координатных сеток / П. И. Полухин, В. К. Воронцов, А. Б. Кудрин, Н. А. Чиченев. - М.: Metallurgia, 1974. - 336 с.
5. Ершов С.В. Развитие теории напряженно-деформированного состояния при прокатке крупных круглых профилей с пониженным трещинообразованием в системах сортовых калибров: диссертация на соискание ученой степени докт. техн. наук: 05.03.05 / С.В. Ершов. – Днепропетровск, 2008. – 339 с.
6. Ершов С.В. Оценка достоверности использования метода конечных элементов при анализе процесса прокатки низких и высоких полос / С. В. Ершов, К. Ю. Ключников, А. П. Лохматов // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в машинобудуванні та металургії: зб. наук. праць. – Краматорськ, 2008. – С. 65 - 70.
7. Целиков А. И. Теория продольной прокатки / А. И. Целиков, Г. С. Никитин, С. Е. Рокотян. - М.: Metallurgia, 1980. - 320 с.