УДК 621.721.01

С. В. Ершов /д. т. н./, М. Н. Штода /к. т. н./ Днепродзержинский государственный технический университет В. В. Мосьпан, К. Г. Геймур ПАО «Днепровский меткомбинат»

# Анализ напряженно-деформированного состояния при прокатке в первых овальных калибрах на современных проволочных станах

В статье выполнен теоретический анализ напряженно-деформированного состояния при прокатке в первых овальных калибрах на современных проволочных станах. Показаны причины возникновения разных видов напряженного и деформированного состояния металла в реальном очаге деформации. Раскрыт механизм процессов, протекающих в металле при прокатке с различной степенью неравномерности деформации в овальных калибрах подобной формы. Сделан сопоставительный анализ калибровок двух ведущих металлургических предприятий Белоруссии и Украины, который показал разную применимость этих калибровок для прокатки катанки из высокопрочных марок сталей. (Ил. 4. Библиогр.: 11 назв.)

*Ключевые слова:* калибровка валков, напряженное состояние, деформированное состояние, очаг деформации, катанка.

In the article the theoretical analysis of the stress-strain state during rolling in the first oval calibers on modern wire mills was made. The reasons for the appearing of different types of stress and strain states of the metal in the real deformation zone are showed. Disclosed a mechanism of processes occurring in the metal during rolling with different degrees of uneven deformation in calibers of oval shape. A comparative analysis of the calibration of the two leading metallurgical enterprises of Belarus and Ukraine was made. The analysis has shown the different applicability of these calibrations for wire rod rolling with use of high strength steels.

Key words: roll design, the state of stress, deformation, deformation zone, wire rod.

#### Введение

Одной из первых задач при разработке любой калибровки валков является выбор схемы получения профиля, т. е. схемы калибров, которая определяет условия прокатки в каждом отдельном калибре.

Для осуществления этой задачи необходим научно-обоснованный анализ влияния схемы формоизменения на напряженно-деформированное состояния металла. На этой основе выбирается окончательная форма калибров. К настоящему времени имеется достаточно разрозненная информация по этому вопросу. Практически отсутствуют всесторонние исследования, объединяющие информацию о напряженнодеформированном состоянии и схемах калибровок валков. Это делает практически невозможным использование существующих научных данных в практических интересах.

В связи с этим вопросы определения напряженно-деформированного состояния для различных промышленных схем деформации и особенно их сопоставления с целью оптимизации являются актуальными и важными для практики прокатного производства.

Анализ последних исследований и литературы

К настоящему времени имеется достаточно большое количество исследований в области

напряженно-деформированного состояния металла при прокатке простых сортовых профилей.

Большая часть этих исследований посвящена деформированному состоянию [1–5]. Основной задачей этих работ было получение зависимостей вытяжки и уширения от основных технологических параметров прокатки. Можно считать, что в этой области большинство вопросов близки к решению и имеются достаточно надежные формулы для усредненного расчета вытяжки и уширения в большинстве известных типах калибров.

Гораздо меньшее количество исследований посвящено напряженному состоянию металла. Это связано со сложностью его определения и трудоемкостью проведения исследований в условиях лаборатории или промышленности.

Имеются примеры очень интересных исследований напряженного состояния, приведенные в работах [6–8]. Эти работы показывают громадный потенциал существующих теоретических методов исследования и раскрывают некоторые сложные вопросы теории прокатки. Однако они не могут ответить на вопросы, стоящие перед инженерным персоналом предприятий о том, какую же всё-таки схему деформации в калибре выбрать с точки зрения надежности выполнения геометрии профиля, точности

<sup>©</sup> С. В. Ершов /д. т. н./, М. Н. Штода /к. т. н./, В. В. Мосьпан, К. Г. Геймур, 2016 г.

его размеров, величины энергосиловых параметров, стойкости калибров.

# Постановка задачи

Основным недостатком существующих работ является то, что деформационные параметры рассчитываются без учета всех особенностей каждого калибра в отдельности. Так, например, все хорошо знают, что одним из главных параметров является обжатие. Возникает вопрос, а как же правильно его определить: по вершине калибра, по приведенной или соответственной полосе, или как-то иначе? От этого будет зависеть величина уширения, заполнения калибра и, в конечном итоге, форма контура выходящей из калибра полосы. Однозначного ответа на этот вопрос нет, и, по всей видимости, он не особенно нужен, если определяется только деформированное состояние. Все дело в том, что практически любая калибровка простых профилей предусматривает компенсацию ошибки расчета деформированного состояния, и в результате в некоторых случаях даже большие ошибки в расчетах не приводят к каким-либо проблемам при прокатке на производстве. Именно поэтому многие калибровщики вообще не пользуются формулами для расчета уширения, а принимают его на основе практических данных.

Все гораздо сложнее при определении напряженного состояния. Здесь даже незначительные, на первый взгляд, изменения формы заготовки или калибра приводят к существенным изменениям напряженного состояния [9].

Сразу нужно поставить вопрос о том, насколько вообще нужно определять напряженнодеформированное состояние металла при прокатке. Иногда этот вопрос возникает у специалистов-практиков, которые работают на предприятиях, прокатывающих нелегированные марки стали с невысоким содержанием углерода. В этом случае металл настолько пластичен, что его можно деформировать почти любым способом, так как схема деформации практически не сказывается на качестве готовой продукции. Все обстоит по-другому, когда вопрос касается прокатки высококачественных легированных или высокоуглеродистых марок сталей. Здесь уже простор для маневра отсутствует, так как возникает проблема появления мелких трещин, которые для любых видов продукции являются недопустимыми.

В связи с этим становится интересным проведение исследований, позволяющих сравнить существующие схемы прокатки между собой для того, чтобы на первых этапах получить хотя бы качественную картину распределения деформаций и напряжений для них и сделать предварительный вывод об их преимуществах и недостатках с точки зрения производства.

Таким образом, целью данной работы является сопоставление напряженно-деформированного состояния при прокатке катанки диаметром 5,5 мм в черновых формирующих калибрах, использующихся на ДМК и БМЗ, для формирования научно-обоснованных представлений о преимуществах и недостатках этих схем, а также причин, вызывающих эти недостатки.

#### Условия проведения исследования

В данной работе приведено сравнение двух черновых формирующих калибров для прокатки катанки диаметров 5,5 мм на двух заводах: Белорусском металлургическом заводе и Днепродзержинском металлургическом комбинате (Украина).

Как видно из рис. 1, эти калибры очень похожи друг на друга и конструктивно, и по габаритным размерам. Различие имеется в радиусах



Рис. 1. Первый калибр черновой группы

скругления отдельных элементов калибров, что выражается только в плавности очертания геометрии.

В калибр БМЗ задается прямоугольная заготовка, а в калибр ДМК – заготовка, полученная из предыдущего ящичного калибра, в котором она приобретает выпуклую боковую поверхность. В результате в схеме деформации БМЗ заготовка начинает деформироваться по ее углам, а заготовка ДМК – по всей контактной поверхности калибра, так как форма калибра и заготовки очень похожи.

Такое различие в заготовках связано с тем, что на БМЗ представленный калибр является первым, и в него поступает геометрически правильный квадрат. В схеме прокатки ДМК представленный на рис. 1 овал является третьим по ходу прокатки калибром. Ему предшествуют два ящичных калибра.

В соответствии с данными таблицы калибровки выполнены расчеты напряженнодеформированного состояния с использованием программного пакета ESV\_Deform, разработанного с применением теории моделирования, изложенной в работе [10], и значительно усовершенствованного в ходе последующих научных работ [11]. При расчете не использовались упрощающие допущения по схемам деформации и условиям прокатки в калибрах. В качестве исходной заготовки БМЗ использована заготовка сечением 125×125 мм, а в качестве заготовки ДМК использована заготовка, полученная расчетным путем из предшествующего ящичного калибра с габаритами 124×128 мм. Приняли равномерное распределение температуры по очагу деформации, а также отсутствие деформационного упрочнения и разупрочнения. Скорость прокатки для БМЗ составляла 0,23 м/с, а для ДМК – 0,27 м/с. Диаметр валков для БМЗ – 550 мм, для ДМК – 650 мм. Марка стали – Ст3сп.

Таким образом, можно считать условия деформации очень похожими.

Нужно отметить, что на качество проката влияют не только первые калибры, но и последующие. В настоящее время анализ напряженнодеформированного состояния при прокатке с использованием схем деформации ДМК и БМЗ выполнен. Он показал, что в каждом последующем калибре имеются свои особенности течения металла и формирования напряженного состояния. Учет этих особенностей при разработке калибровок валков позволит избежать схем напряженного состояния, неблагоприятных для качества прокатываемого металла. Публикация данных материалов ожидается в скором времени.

### Анализ полученных результатов

В результате расчета был получен трехмерный очаг деформации с внешними зо-Разработанное программное нами. обеспечение позволяет выполнить анализ напряженно-деформированного состояния в любом сечении реального очага деформации. Под термином «реальный очаг деформации» понимается совокупность зон, включающая зону, где металл непосредственно деформируется валками, и зон внеконтактной деформации, где металл деформируется только за счет взаимодействия отдельных участков профиля друг с другом.

Предварительное рассмотрение напряженнодеформированного состояния показало, что в очаге деформации присутствуют три зоны, отличающиеся друг от друга течением металла и видами напряженного состояния. Поэтому для анализа были выбраны наиболее характерные сечения вдоль очага деформации. Они соответствовали следующим плоскостям: плоскости перед касанием полосы с валками; плоскости, соответствующей средине очага деформации; плоскости выхода из очага деформации.

По такому же принципу были выбраны и точки в каждом поперечном сечении очага деформации. Кроме этого, на выбор точек для анализа повлияли результаты исследований других авторов, в частности результаты работ [8; 9]. Следует отметить, что при использовании метода конечных элементов нет ограничений по выбору точек и сечений для рассмотрения.

На рис. 2 и 3 сечению входа в очаг деформации соответствует № 1, средине очага деформации – № 2, плоскости выхода из очага деформации – № 3.

#### Исследование прокатки в калибре БМЗ

В начале очага деформации в обоих вариантах начальная деформация возникает в угловых участках полосы (точка 2 на рис. 1). Однако схема БМЗ приводит к большей неравномерности деформации. В результате, перед касанием полосы с валками по калибровке БМЗ максимум скоростей продольного перемещения υ<sub>γ</sub> расположен между поверхностью полосы и горизонтальной осью симметрии. В этом случае в осевых (точки 0 и 3) и поверхностных участках (точка 1) возникают растягивающие напряжения. В калибровке ДМК максимум продольных скоростей находится в поверхностных слоях с большей величиной в области углов полосы. И та, и другая калибровка приводит к возникновению в поверхностном слое заготовки растягивающих напряжений в области вертикальной оси симметрии (точка 1).



Рис. 2. Распределение скоростей в сечениях очага деформации ДМКД и БМЗ в точках раската, соответствующих рис. 1



Рис. 3. Распределение напряжений в сечениях очага деформации ДМКД и БМЗ в точках раската, соответствующих рис. 1

По калибровке БМЗ максимальная величина продольных растягивающих напряжений  $\sigma_x$ в поверхностном слое (точка 1) перед касанием полосы с валками равна 63 МПа, а по калибровке ДМК – 59 МПа. Однако по калибровке ДМК полностью отсутствуют растягивающие напряжения  $\sigma_x$  в осевой области заготовки (точка 0). По калибровке БМЗ они составляют 28 МПа.

За счет большей степени деформации угловых участков (точка 2) металл этих участков перетекает в сторону уширения (скорость  $v_{\mu}$ ) и тянет за собой металл из центральных участков полосы (точки 0 и 2), где обжатие меньше. Тянущему воздействию подвергаются и поверхностные слои металла, движение которых в поперечном направлении сдерживается контактными силами трения. При этом в них возникают поперечные растягивающие напряжения. Калибровка БМЗ приводит к большей величине поперечных растягивающих напряжений  $\sigma_{\mu}$  в поверхностных участках раската в области точки 1 (63 МПа) по сравнению с напряжениями σ<sub>ν</sub> в поверхностных слоях полосы по калибровке ДМК (58 МПа). Еще большая разница напряжений наблюдается в области, близкой к осевой (точка 0), где по калибровке БМЗ напряжения σ<sub>ν</sub> достигают величины 35 МПа, а по калибровке ДМК – напряжения сжимающие (–36 МПа).

В средней по длине части очага деформации распределение скоростей течения металла по обоим методам калибровки также значительно отличается. Так, при калибровке по методу БМЗ максимум продольных скоростей течения v<sub>r</sub> расположен в области горизонтальной оси симметрии (точки 0 и 3), а по калибровке ДМК - в области контакта полосы с валком (точки 1 и 2). Причем по калибровке БМЗ этот максимум смещен ближе к боковым частям раската из-за большего обжатия по краям, то есть даже в середине очага деформации сохраняется влияние процессов, наблюдаемых в области начальной деформации. По калибровке ДМК максимум скоростей смещен к вертикальной оси симметрии, что свидетельствует о затухании неравномерности деформации, наблюдаемой в начале очага деформации.

Обе калибровки приводят к появлению в средней по длине части очага деформации продольных сжимающих напряжений  $\sigma_x$ . По калибровке БМЗ они достигают величины 80 МПа, а по калибровке ДМК – 40 МПа. Однако из-за сохраняющейся неравномерности деформации по калибровке БМЗ в данной части очага деформации присутствуют значительные поперечные растягивающие напряжения  $\sigma_y$  (60 МПа). Здесь ими охвачен весь поверхностный и приповерхностный слой полосы (точки 1 и 2). По ка-

либровке ДМК растягивающие напряжения  $\sigma_y$  (35 МПа) присутствуют только в месте перехода от дна калибра к его боковой стенке (точка 2) и связаны не с неравномерностью деформации, а с влиянием боковой стенки калибра, которая увлекает за собой металл, как бы вытягивая его в поперечном направлении. В остальной части полосы все напряжения сжимающие. Кроме этого, по калибровке БМЗ в поверхностных слоях полосы (точки 1 и 2) возникают и вертикальные растягивающие напряжения  $\sigma_z$  (60 МПа), обусловленные той же неравномерностью деформации. По калибровке ДМК растягивающие вертикальные напряжения отсутствуют.

В области выхода полосы из очага деформации по методу калибровки БМЗ сохраняется влияние первоначальной неравномерности деформации. По калибровке ДМК следы начальной неравномерности деформации полностью исчезают. Как следствие, схемы течения металла опять разные. По калибровке БМЗ максимум продольной скорости течения металла  $v_x$  находится в области горизонтальной оси симметрии раската с локальным максимумом, расположенным между точками 0 и 3. По калибровке ДМК продольное течение металла более равномерное, то есть отсутствуют локальные ярко выраженные максимумы скоростей, обусловленных неравномерным распределением деформации.

В результате, по калибровке БМЗ практически вся центральная (осевая) часть раската (точка 0) охвачена продольными растягивающими напряжениями σ<sub>x</sub> величиной порядка 40 МПа, в то время как по калибровке ДМК в центральной части присутствуют только сжимающие напряжения  $\sigma_x$ . По калибровке БМЗ в боковой части раската в области разъема (точка 3) действуют продольные сжимающие напряжения  $\sigma_r$ величиной до -40 МПа. По калибровке ДМК в этой части полосы действуют растягивающие напряжения σ<sub>x</sub> величиной до 60 МПа. Как и ранее, калибровка БМЗ приводит к возникновению поперечных растягивающих напряжений σ<sub>ν</sub> в поверхностных контактных слоях полосы от точки 1 и практически до точки 2. Причем здесь напряжения  $\sigma_{\nu}$  достигают величины 90 МПа, а значит, появляется реальная опасность разрушения поверхностного слоя полосы. Только в боковой части раската (точки 2 и 3) напряжения σ<sub>ν</sub> становятся сжимающими.

Приведенный анализ показал, что форма чернового овального калибра в сочетании с формой заготовки БМЗ приводят к возникновению растягивающих напряжений в поверхностных слоях полосы практически на всем протяжении очага деформации. Величина напряжений сопоставима с пределом текучести метал-

ла. Отсюда следует, что для использования такой калибровки необходим металл очень высокого качества без каких-либо поверхностных дефектов. Только в этом случае металл способен выдержать описанное выше напряженное состояние. Положительной стороной калибровки БМЗ является то, что в области выхода раската из валков в боковых частях полосы отсутствуют растягивающие напряжения. Учитывая, что при прокатке по калибровке ДМК они присутствуют, мы понимаем, что калибровка ДМК может быть улучшена путем незначительного увеличения неравномерности деформации с тем, чтобы сохранить все достоинства существующей калибровки и уменьшить напряжения в боковых частях.

Объединим приведенные данные способом, который покажет разницу в напряженном состоянии металла при использовании калибровок двух заводов. В качестве такого способа воспользуемся информацией о площади поперечного сечения раската, охваченной растягивающими напряжениями. Представим эту информацию графически на рис. 4.

Как видно, калибровка ДМК имеет явное превосходство с точки зрения качества напряженного состояния, так как в очаге деформации преобладают зоны со сжимающими напряжениями. При данной схеме деформации присутствуют места с растягивающими напряжениями, но продолжительность их действия гораздо меньшая, чем в калибровке БМЗ. Это дает основание утверждать, что калибровка ДМК позволяет прокатывать менее качественный металл без опасения разрушить поверхностный или внутренний слой раската.

Использование рассмотренного калибра ДМК при надлежащем качестве металла позволяет предположить низкую вероятность появления дефектов прокатного происхождения. Еще большую уверенность получения хороших результатов дает то, что в отличие от калибровки БМЗ рассмотренный калибр является третьим, и здесь металл уже получил начальную деформацию. При использовании литой заготовки в поверхностных слоях успевает произойти частичное разрушение литой структуры, что еще лучше сказывается на результатах деформации.

Проведенные исследования показывают, что при всем многообразии исследований напряженного состояния, осуществленных в условиях прокатки на гладкой бочке, их результатов недостаточно для объяснения напряженнодеформированного состояния при прокатке в калибрах. Здесь наблюдается объединение явлений, свойственных простому случаю прокатки, и явлений, свойственных прокатке в калибре. Для исследованных в статье схем деформации наблюдается некоторая общность в виде распределения продольной составляющей скорости течения и совершенное различие в поперечной составляющей скорости металла.

Это подчеркивает важность проведенных ранее исследований для гладкой бочки, но говорит о необходимости формирования теории прокатки в калибрах на основе современных исследований с использованием численных методов, основанных на фундаментальных положениях физики твердого тела.

#### Выводы

1. В работе выполнен комплексный анализ напряженно-деформированного состояния металла без упрощения формы инструмента и заготовки.

2. Установлено, что при общей схожести видов калибров наблюдается разный характер течения металла и разные виды напряженных состояний в реальном очаге деформации. Причиной этого является сильное влияние сочетания формы калибра и формы деформируемой заготовки.

3. Показано, что схема деформации в первом овальном формирующем калибре, используе-



■Gx ■Gy ■Gz

Рис. 4. Сопоставление площадей, охваченных растягивающими напряжениями для калибров ДМК и БМЗ

мая для прокатки катанки на Белорусском металлургическом заводе, имеет ряд недостатков, снижающих вероятность прокатки качественного металла и особенно высокоуглеродистых и легированных марок сталей.

4. Схема деформации в первом овальном формирующем калибре Днепровского металлургического комбината имеет явное превосходство с точки зрения качества напряженного состояния и вероятности прокатки металла без дефектов прокатного происхождения.

#### Библиографический список

1. Бахтинов Б. П. Калибровка прокатных валков / Б. П. Бахтинов, М. М. Штернов. – М.: Металлургиздат, 1953. – 784 с.

2. Чекмарев А. П. Калибровка прокатных валков: учебное пособие для вузов / А. П. Чекмарев, М. С. Мутьев, Р. А. Машковцев. – М.: Металлургия, 1971. – 512 с.

3. Минкин А. В. Расчет систем вытяжных калибров / А. В. Минкин. – М.: Металлургия, 1989. – 208 с.

4. Смирнов В. К. Деформации и Усилия в калибрах простой формы / В. К. Смирнов, В. А. Шилов, К. И. Литвинов. – М.: Металлургия, 1982. – 144 с.

5. Николаев В. А. Теория прокатки: монография / В. А. Николаев. -Запорожье: Изд-во Запорожской государственной инженерной академии, 2007. - 228 с.

6. Полухин П. И. Деформации и напряжения при обработке металлов давлением. При-

менение метода муар и координатных сеток / П. И. Полухин, В. К. Воронцов, А. Б. Кудрин,

Н. А. Чиченев. - М.: Металлургия, 1974. - 336 с.

7. Эффективность деформации сортовых профилей / С. А. Тулупов, Г. С. Гунн, В. Д. Онискив [и др.]. – М.: Металлургия, 1990. – 280 с.

8. Воронцов В. К. Экспериментальные методы механики деформируемых твердых тел / В. К. Воронцов, П. И. Полухин, В. А. Белевитин, В. В. Бринза. – М.: Металлургия, 1990. – 480 с.

9. Ершов С. В. Сравнение методов исследования напряженно-деформированного состояния металла при прокатке в сортовом калибре / С. В. Ершов, М. Н. Штода, В. В. Степчук // Вісник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія машинобудування. – 2011. – № 62. – С. 137–140.

10. Теоретические основы обработки металлов давлением: в 2 т. / Б. М. Илюкович, А. П. Огурцов, Н. Е. Нехаев, С. В. Ершов. Т. 2. – Днепропетровск: РИА «Днепро-ВАЛ», 2002. – С. – 485 с.

11. Ершов С. В. Развитие теории напряженнодеформированного состояния при прокатке крупных круглых профилей с пониженным трещинообразованием в системах сортовых калибров: дис. ... д-ра техн. наук: 05.03.05 / С. В. Ершов. – Днепродзержинск, 2008. – 339 с.

### Поступила 16.03.2016

Наука



УДК 621.771.23

В. А. Николаев /д. т. н./, А. Г. Васильев, С. В. Жученко Запорожская государственная инженерная академия

# Способы воздействия на межвалковый зазор в клети кварто. Сообщение 2

Величина изгиба опорного валка в значительной мере обусловлена степенью свободы перемещения в вертикальной плоскости шеек относительно подушек.

Предложена конструкция валков клети кварто с коническими шейками под подшипники качения, которые обеспечивают повышение стойкости подшипников и улучшение условий регулирования межвалкового зазора.

Предложена конструкция обводного ролика с регулярным рельефом поверхности, которая может обеспечить выравнивание продольных напряжений натяжения по ширине полосы и улучшение качества формирования рулона. (Ил. 3. Библиогр.: 9 назв.)

*Ключевые слова:* опорный и рабочий валки, изгиб, шейки валков, подшипники, полоса, натяжение, напряжения, обводной ролик, рельеф.

<sup>©</sup> В. А. Николаев /д. т. н./, А. Г. Васильев, С. В. Жученко, 2016 г.