

**В. А. ХАРИТОНОВ**, канд. техн. наук, проф., МГТУ им. Г.И. Носова, Магнитогорск  
**И. В. ТАРАНИН**, аспирант, МГТУ им. Г.И. Носова, Магнитогорск

### **ВЛИЯНИЕ КАЛИБРОВКИ ВАЛКОВ НА НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ В ОЧАГЕ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ПРОКАТКЕ КАТАНКИ**

В статье проанализировано напряженное состояние металла в очаге деформации при горячей прокатке катанки на основе моделирования методом конечных элементов в среде программного комплекса “DEFORM-3D”. Проведен сравнительный анализ известных двух- и многовалковых систем калибров. Выявлены факторы калибровки валков, определяющие величину и характер распределения продольных растягивающих напряжений в очаге деформации.

**Ключевые слова:** напряженное состояние, катанка, метод конечных элементов, калибровка валков

**Введение.** Одним из основных элементов технологии производства катанки является калибровка валков, особенности которой во многом определяют эффективность производства проката и его качественные показатели. Долгое время подход к проектированию систем калибров при горячей прокатке катанки основывался на решении задач, связанных с обеспечением требуемой точности геометрических размеров, стабильности процесса непрерывной прокатки, обеспечения необходимой вытяжной способности калибров при максимально возможной плавности формоизменения. Благодаря развитию оборудования прокатных станов большинство этих задач на сегодняшний день успешно решены. Дальнейшее повышение эффективности производства катанки, с точки зрения совершенствования калибровок валков, должно идти по направлению развития таких систем калибров, которые позволяли бы достигать оптимального уровня механических свойств проката с учетом температурно-скоростных условий деформации катанки в заключительных проходах на современных высокоскоростных проволочных станах. Для этого необходим принципиально новый подход к проектированию калибровок валков, на основе которого помимо традиционных критериев рациональности калибровки [1], учитывалось бы напряженно-деформированное состояние (НДС) металла в очаге деформации.

**Содержание работы.** Изучению напряженного состояния при прокатке в гладких и калиброванных валках посвящено множество работ. Так общеизвестно влияние фактора формы очага деформации, который представляет собой отношение длины дуги захвата к средней толщине полосы  $l_d/H_{cp}$ , а также угла захвата  $\alpha$  на напряженное состояние при прокатке. При определенных значениях  $l_d/H_{cp}$  и  $\alpha$ , соответствующих «высокому» очагу, в осевой зоне прокатываемого металла действуют продольные растягивающие напряжения, величина которых может превышать предел текучести материала и приводить к зарождению трещин и разрушению металла при прокатке [2].

Прокатка в калибрах характеризуется более сложным напряженным и деформированным состоянием ввиду характера течения металла при неравномерной деформации. Авторами [3] приведены результаты исследований напряженно-деформированного состояния при пластической деформации в вытяжных системах двухвалковых калибров на основе поляризационно-оптического метода. Показано, что в процессе прокатки на разных этапах формоизменения полосы в очаге деформации напряженное состояние неравномерно. Неравномерное деформированное состояние, контактные условия и свойства материала приводят к возникновению в объеме деформируемого металла продольных растягивающих напряжений в осевой зоне в сечениях входа в геометрический очаг де-

формации и на расстоянии до 10 % его длины. Также продольные растягивающие напряжения действуют на боковых внеконтактных зонах в зоне разъемов калибра практически по всей длине очага деформации.

В работах [4,5] приведены результаты экспериментальных исследований деформированного состояния металла в процессе прокатки в многовалковых системах калибров. Показано, что несмотря на присущие данному способу преимущества, прокатка металла осуществляется в условиях неравномерной деформации по сечению полосы и длине очага деформации, что является причиной соответствующего неравномерного напряженного состояния и возможного развития растягивающих напряжений.

Целью данной работы является изучение НДС в очаге деформации при прокатке катанки в условиях, характерных для заключительных проходов в чистовых блоках проволочных станов, а также проведение сравнительного анализа известных систем калибров и выявление значимых элементов калибровки, влияющих на напряженное состояние в очаге деформации.

В качестве метода исследования использовался метод конечных элементов, реализованный в программном комплексе «DEFORM-3D». Моделировались различные задачи горячей прокатки катанки в двух- и многовалковых системах калибров по схемам: овал-круг, плоский овал-круг, невыполненный треугольник-круг, стрельчатый треугольник-круг, вогнутый треугольник-круг, квадрат-круг (рисунок 1).

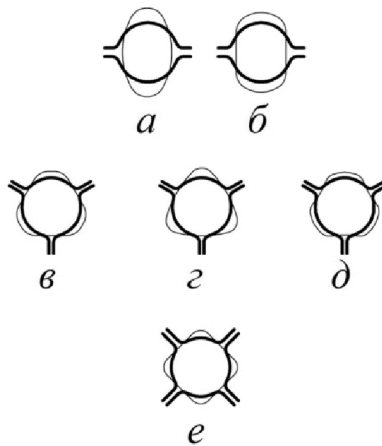


Рис. 1. – Схемы прокатки катанки:

*а* – овал-круг; *б* – плоский овал-круг; *в* – невыполненный треугольник-круг; *г* – стрельчатый треугольник-круг; *д* – вогнутый треугольник-круг; *е* – квадрат-круг

При постановке задач были приняты следующие допущения: рассматриваемый процесс является симметричным; рабочий инструмент рассматривался как абсолютно жесткое тело с постоянной температурой; прокатываемый материал считается однородным, изотропным; деформируемая среда – вязкопластическая. Трение описывалось по закону Зибеля (Shear) [6]. Показатель трения во всех случаях задавался постоянным и равным 0,4. В качестве деформируемой среды использовался материал из стандартной библиотеки DEFORM: сталь AISI-1045 (Machining), для которого определена зависимость сопротивления деформации от значения скорости деформации в интервале от 1 до 500000 1/с. Во всех задачах исходный размер полосы задавался таким образом, чтобы обеспечивалось оптимальное заполнение калибров, конечный диаметр катанки составлял 5,5-5,6 мм. Коэффициент вытяжки подбирался в пределах 1,22-1,28. Ввиду симметрии процесса рассматривалась 1/4 модель очага деформации для двухвалковых систем калибров, 1/6 – для трехвалковых и 1/8 – для четырехвалковых. Подобная дискретизация на симметричные сектора существенно упрощает и ускоряет расчет. Начальная температура деформации принималась для всех задач равномерно распределенной по сечению заго-

товки и равной 900 °С. Диаметр валков – 175 мм. Частота вращения валков–14700 об/мин, что соответствовало конечной скорости прокатки 134-137 м/с.

В результате моделирования получены характерные поля действующих продольных напряжений  $\sigma_{xx}$  в объеме прокатываемого по различным схемам металла. На рисунке 2 представлено распределение продольных напряжений в продольно-вертикальной плоскости XOY, а также в приконтактных слоях прокатываемой заготовки.

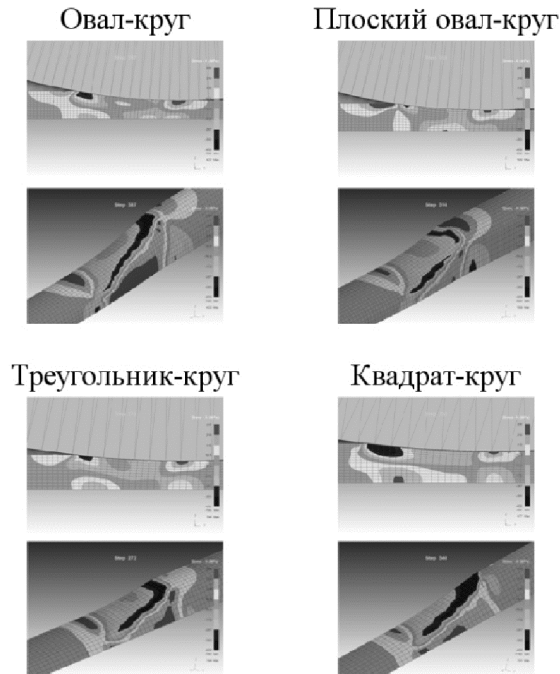


Рис. 2. – Распределение продольных напряжений  $\sigma_{xx}$

Полученные результаты свидетельствуют о неравномерном характере напряженно-го состояния при прокатке по всем рассмотренным схемам. Помимо сжимающих напряжений в очаге деформации, а также во внеконтактных областях действуют большие по значению растягивающие напряжения. Полученный характер распределения напряжений в основном объеме очага деформации сопоставим с экспериментальными данными [3]. При этом полученные для различных схем результаты позволяют выявить более полную картину действия внеконтактных напряжений. Так в объеме прокатываемого металла можно выделить четыре зоны действия продольных растягивающих напряжений  $\sigma_{xx}$ :

- осевая зона на протяжении от входа до 0,1... 0,8 длины очага деформации (в зависимости от схемы прокатки);
- внеконтактная зона на входе в очаг деформации;
- внеконтактная зона на выходе из очага деформации;
- внеконтактная зона по кромкам полосы в разъеме калибра.

Действие растягивающих напряжений в тех или иных объемах прокатываемого металла определяется различными технологическими факторами и особенностями течения металла. Во многом это зависит от контактных условий, площади и формы контактной поверхности прокатываемой заготовки и валка. Действие растягивающих напряжений во внеконтактных областях на боковой поверхности раската является общеизвестным фактом, при этом величина данных напряжений зависит от степени «охвата» металла валками. Действие растягивающих напряжений в осевой зоне при прокатке в калибрах – известный, но при этом малоизученный факт. Следует отметить, что осевые растягивающие напряжения могут оказывать существенное влияние на свойства катанки и технологичность ее переработки при волочении, поскольку именно в центральной зоне металла

при волочении действует наиболее неблагоприятная схема напряженного состояния.

В таблице 1 представлены обобщенные данные о напряженном состоянии в очаге деформации при прокатке по рассмотренным двух- и многовалковыми схемам. Как видно из таблицы, многовалковые системы характеризуются наиболее высокими осевыми растягивающими напряжениями. Наименьшие напряжения в осевой зоне действуют при прокатке по схеме плоский овал-круг. При этом для систем плоский овал-круг и вогнутый треугольник-круг характерны высокие значения продольных напряжений во входной внеконтактной зоне очага деформации. Традиционно применяемая при прокатке катанки схема овал-круг характеризуется наиболее высокими напряжениями, действующими в приконтактных слоях металла в выходной зоне и на боковой поверхности в разъеме калибра. Также довольно высоки напряжения, действующие в осевой зоне и в приконтактном слое металла на входе в очаг деформации.

Таблица 1. – Данные о напряженном состоянии в очаге деформации при прокатке

| Схема прокатки                 | Коэффициент вытяжки $\mu$ | Максимальные напряжения $\sigma_{xx}$ , МПа |                    |            |            |
|--------------------------------|---------------------------|---|--------------------|------------|------------|
|                                |                           | Осевая зона                                 | Внеконтактная зона |            |            |
|                                |                           |   | Входная            | Выходная   | Разъем     |
| Овал-круг                      | 1,25                      | 152   | 225                | <b>330</b> | <b>322</b> |
| Плоский овал-круг              | 1,28                      | 59  | <b>390</b>         | 251        | 214        |
| Невыполненный треугольник-круг | 1,24                      | <b>191</b>                                  | 123                | 260        | 234        |
| Вогнутый треугольник-круг      | 1,22                      | <b>179</b>                                  | <b>335</b>         | 212        | 180        |
| Стрельчатый треугольник-круг   | 1,27                      | <b>238</b>                                  | 20                 | 228        | <b>279</b> |
| Квадрат-круг                   | 1,22                      | <b>220</b>                                  | 25                 | 230        | 234        |

На рисунке 3 представлено напряженное и деформированное состояние металла в различных поперечных сечениях очага деформации на примере прокатки по схеме овал-круг.

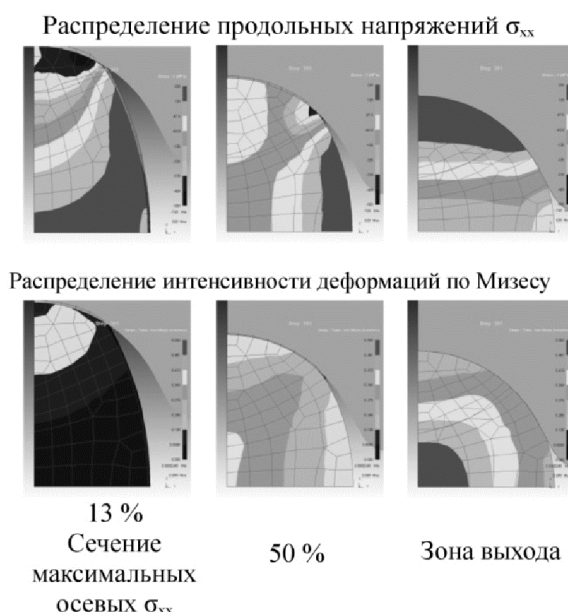


Рис. 3. – Напряженно-деформированное состояние в различных сечениях очага деформации при прокатке по схеме овал-круг

Обобщая полученные результаты, можно сделать следующие выводы о влиянии схемы деформирования на развитие растягивающих напряжений в различных объемах прокатываемого металла:

1. Действие осевых продольных растягивающих напряжений обусловлено неравномерным деформированным состоянием в металле на расстоянии 10-15 % от входа в очаг деформации. В данных сечениях заготовки деформация локализована в приконтактных слоях металла (рис. 3). При этом, чем больше степень заполнения предыдущего по ходу калибра, характеризующая площадь контакта металла с валком на данном этапе формоизменения, тем больше локализация деформации и выше возникающие продольные растягивающие напряжения в центре раската (характерные схемы: овал-круг, стрельчатый треугольник-круг, квадрат-круг).

Более высокие значения осевых растягивающих напряжений для многовалковых систем объясняются схемой деформирования металла, при которой при всесторонней деформации приконтактных слоев возникает соответствующее отставание слоев металла в осевой зоне. При этом также, чем больше степень заполнения предыдущего по ходу калибра, тем выше напряжения в центре (схемы квадрат-круг, стрельчатый треугольник-круг).

2. Величина напряжений, действующих во внеконтактных зонах в разъеме калибра, зависит от соотношения исходной ширины полосы и калибра («степень охвата металла валками»). Чем меньше площадь неконтактной поверхности полосы с калибром, тем меньше соответствующие растягивающие напряжения.

3. Продольные напряжения в приконтактных слоях металла выходной зоны очага деформации определяются опережением при прокатке, при этом, чем выше степень деформации центральных слоев на выходе, тем сильнее отстают приконтактные слои, в которых соответственно возникают продольные растягивающие напряжения (характерная схема: овал-круг).

4. Напряжения, действующие во внеконтактной зоне на входе в очаг деформации, так же, как и на выходе определяются влиянием внешнего трения со стороны инструмента. При этом величина данных напряжений зависит от площади контакта металла с валком в сечении входа в очаг деформации. Чем больше контактная площадь в данном сечении, тем выше по значению продольные растягивающие напряжения в данной зоне (характерные схемы: плоский овал-круг, вогнутый треугольник-круг).

**Выводы.** На основе конечно-элементного моделирования изучено напряженное состояние при горячей прокатке круглой катанки в двух- и многовалковых системах калибров в условиях, характерных для заключительных проходов в чистовых блоках проволочных станов.

Установлено, что характер распределения напряжений в очаге деформации существенно зависит от формы и площади контактной поверхности, которая определяется формой задаваемого сечения и калибра. Так по результатам моделирования прокатка катанки по традиционно применяемой схеме овал-круг характеризуется наиболее высокими продольными растягивающими напряжениями, действующими во внеконтактных зонах по разъему калибра и в зоне выхода из очага деформации в приконтактных слоях металла, а также довольно высокими напряжениями в осевой зоне.

Результаты моделирования прокатки по схеме плоский овал-круг показали, что действие осевых растягивающих напряжений можно минимизировать, а также существенно снизить напряжения во внеконтактных зонах в разъеме калибра и в зоне выхода из очага деформации.

При прокатке в многовалковых системах калибров в осевой зоне прокатываемого металла в виду всестороннего обжатия действуют высокие продольные растягивающие напряжения, величина которых зависит от степени заполнения предыдущего по ходу прокатки калибра, характеризующую площадь контакта металла с калибром на данном этапе формоизменения. При этом чем меньше данная контактная площадь, тем выше на-

пряжения в центре и ниже на поверхности во внеконтактной области на входе в очаг деформации. При многовалковой прокатке существенную роль играет большая площадь контактной поверхности на протяжении всего очага деформации, что снижает величину действующих растягивающих внеконтактных напряжений.

Полученные результаты могут быть полезны при проектировании новых более эффективных систем калибров и разработке нетрадиционного подхода к проектированию калибровок валков проволочных станков с учетом НДС в очаге деформации.

**Список литературы:** 1. Смирнов В.К., Шилов В.А., Инарович Ю.В. Калибровка прокатных валков: Учебное пособие для вузов. – М.: Теплотехник. - 2008. - 490 с. 2. Филиппов Э.Л., Клименко В.М. Изучение напряжений при прокатке высоких полос в гладких валках // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия №4. - 1973. - С 105-108. 3. Эффективность деформации сортовых профилей / Тулупов С.А., Гун Г.С., Онискив В.Д., Курдюмова В.А., Радюкевич К.Л. - М.: Металлургия. - 1990. - 280 с. 4. Деформация металла в многовалковых калибрах / Поляков М.Г., Никифоров Б.А., Гун Г.С. - М.: Металлургия. - 1979. - 240 с. 5. Прокатка малопластичных металлов с многосторонним обжатием: Учебное пособие для вузов / Барков Л.А., Выдрин В.Н., Пастухов В.В., Чернышев В.Н. - Челябинск: Металлургия, Челябинское отделение. - 1988. - 304 с. 6. Колмогоров В.Л. Механика ОМД. - М.: Металлургия. - 1986. - 687 с.

*Надійшла до редколегії 22.10.2012*

УДК 621.771.011

**Влияние калибровки валков на напряженное состояние в очаге деформации при прокатке катанки/ Харитонов В.А., Таранин И.В. Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. - Харків: НТУ «ХПІ». - 2012. - № 46(952). - С.198-203. – Бібліогр.: 6 назв.**

У статті проаналізовано напружений стан металу в осередку деформації при гарячій прокатці катанки на основі моделювання методом кінцевих елементів в середовищі програмного комплексу "DEFORM-3D". Проведено порівняльний аналіз відомих двох- і багатовалкових систем калібрів. Виявлено фактори калібрування валків, що визначають величину і характер розподілу поздовжніх розтягуючих напруг у вогнищі деформації.

In article are analyzed stress conditions of metal in deformation zone at the hot rolling of rod using finite element method by means computer simulation in program system "DEFORM-3D". The known systems of calibers are analyzed and compared. The features of roll pass design, which influence to the magnitude and distribution of the longitudinal tensile stresses in the deformation zone are determined.

УДК 621.77.014

**А. В. ГРУШКО**, канд. техн. наук, доц., ВНТУ, Вінниця

**Т. И. МОЛОДЕЦКАЯ**, аспирант, ВНТУ, Вінниця

**Р. С. ТКАЧЕНКО**, преп. науч.-метод. отдела, ВВПУ ЛГУБЖ, Вінниця

**А. В. ГУЦАЛЮК**, магистрант, ВНТУ, Вінниця

### **ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ В УСЛОВИЯХ ПОПЕРЕЧНОГО ИЗГИБА ТОЛСТОЛИСТОВОЙ ШИРОКОЙ ЗАГОТОВКИ**

Исследовано деформированное состояние заготовки при поперечном изгибе с использованием метода конечных элементов. Выявлены четыре характерных стадии изгиба, что свидетельствуют о нестационарности процесса гибки. Установлено, что наиболее управляемый технологический фактор, с точки зрения уменьшения деформации, является плечо деформаций. Результаты моделирования методом конечных элементов проверяли исследованием трехточечного изгиба широкой заготовки.

**Ключевые слова:** деформированное состояние, метод конечных элементов, поперечный изгиб, кривая течения.

Експериментально-теоретическому аналізу теорії изгиба посвящен достаточно широкий пласт научных исследований. Основной предпосылкой при таком анализе является гипотеза плоских нормалей, ставящая в однозначную зависимость продольные де-