

УДК 621.771.011

В.А. Харитонов, И.В. Таранин

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ В ОЧАГЕ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ПРОКАТКЕ КАТАНКИ В РАЗЛИЧНЫХ СИСТЕМАХ КАЛИБРОВ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Аннотация. Проанализировано напряженное состояние металла в очаге деформации при горячей прокатке катанки на основе моделирования методом конечных элементов в среде программного комплекса DEFORM-3D. Представлена методика оценки напряженного состояния при горячей высокоскоростной прокатке катанки. 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 металла, деформация, горячая прокатка, моделирование.

ANALYSIS OF DEFLECTED MODE IN THE DEFORMATION ZONE DURING THE ROD ROLLING IN VARIOUS CALIBER SYSTEMS BASED ON THE MODELING BY FINITE ELEMENT METHOD

Abstract. In the article the stressed state of metal in the deformation zone during hot rolling of rod using the finite element method for computer simulation in program system DEFORM-3D are analyzed. The methodology for evaluation of the stressed state during the high-speed hot rolling of rod is presented. The known systems of calibers are analyzed. The factors of roll pass design, which influence the magnitude and distribution of the longitudinal tensile stresses in the deformation zone, are determined.

Keywords: stressed state of metal, deformation, hot rolling, modeling.

Повышение качества катанки и степени ее технологической готовности на сегодняшний день является актуальной проблемой. Катанка должна иметь не только требуемый уровень геометрических характеристик профиля и механических свойств, но и эффективную технологичность при переработке на последующем металлургическом переделе.

Одним из основных элементов технологии производства катанки является калибровка валков, особенности которой во многом определяют эффективность производства катанки и ее 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 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 металла в очаге деформации.

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 α захвата на напряженное состояние при прокатке. При определенных значениях l_d/H_{cp} и α , 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 работы [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 неравно-

мерно. 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 деформации 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 этому 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. Хотя при этом прокатка в многовалковых калибрах хорошо зарекомендовала себя при производстве малопластичных металлов.

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

При исследованиях использовался метод конечных элементов, реализованный в программном комплексе DEFORM-3D. Это один из наиболее универсальных и эффективных методов моделирования и изучения процессов обработки металлов давлением на сегодняшний день.

Моделировались различные задачи горячей прокатки катанки в двух- и многовалковых системах калибров по схемам, представленным на рис. 1: овал – круг (поз. *a*), плоский овал – круг (поз. *б*), невыполненный треугольник – круг (поз. *в*), стрелчатый треугольник – круг (поз. *г*), вогнутый треугольник – круг (поз. *д*), квадрат – круг (поз. *е*).

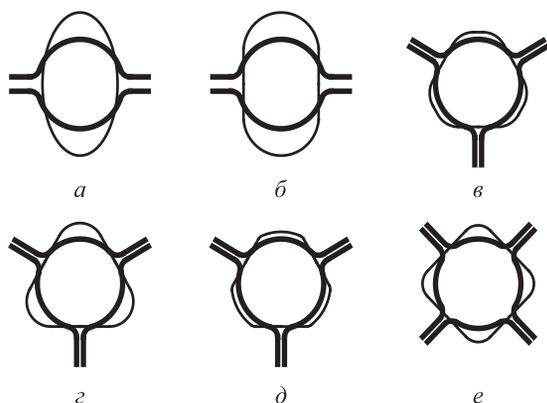


Рис. 1. Схемы прокатки катанки

При постановке задач были приняты следующие допущения:

- рассматриваемый процесс является симметричным;
- рабочий инструмент рассматривается как абсолютно жесткое тело с постоянной температурой;
- прокатываемый материал считается однородным, изотропным;
- деформируемая среда – вязкопластическая.

Трение описывалось по закону Зибеля (Shear) [6]: $\tau = \mu \tau_s$, где μ – показатель трения (изменяется от нуля до единицы); τ_s – сопротивление деформации на сдвиг.

Показатель трения μ 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 скорости деформации в интервале от 1 до 500 000 с⁻¹. Во всех задачах условия прокатки и исходный размер полосы задавались таким образом, чтобы обеспечивалось оптимальное заполнение калибров, конечный диаметр катанки составлял 5,5 – 5,6 мм.

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 заготовки и равной 900 °С; диаметр валков 175 мм; частота вращения валков 14 700 об/мин, что соответствовало конечной скорости прокатки 134 – 137 м/с.

В результате моделирования получены характерные поля действующих продольных напряжений σ_{xx} в объеме прокатываемого по различным схемам металла. На рис. 2 представлено распределение продольных напряжений в продольно-вертикальной плоскости XOY (поз. *a*), а также в приконтактных слоях прокатываемой заготовки (поз. *б*).

Полученные результаты свидетельствуют о неравномерном характере напряженного 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 σ_{xx} :

- осевую на протяжении от входа до 0,1 – 0,8 длины очага деформации;
- внеконтактную на входе в очаг деформации;

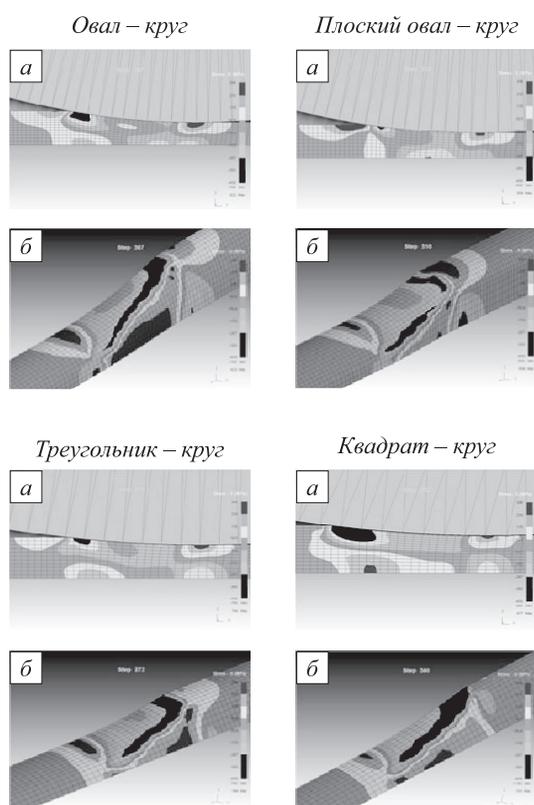


Рис. 2. Распределение продольных напряжений σ_{xx}

- внеконтактную на выходе из очага деформации;
- внеконтактную 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 площади и формы контактной поверхности прокатываемой заготовки и валика. Так, действие внеконтактных продольных растягивающих напряжений на входе и выходе из очага деформации можно объяснить влиянием внешнего трения со стороны инструмента и наличием зон отставания и опережения в очаге деформации. Развитие растягивающих напряжений во внеконтактных областях на боковой поверхности раската является общеизвестным фактом, при этом величина этих напря-

жений зависит от степени «охвата» металла валиками. 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 представлены обобщенные данные о напряженном состоянии в очаге деформации при прокатке по рассмотренным двух- и многовалковым 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 высокие напряжения, действующие в осевой зоне и в приконтактном слое металла на входе в очаг деформации.

На рис. 3 представлено напряженное и деформированное состояние металла в различных поперечных сечениях очага деформации на примере прокатки по схеме овал – круг. Анализ деформированного состояния на разных этапах формоизменения позволяет выявить факторы, определяющие действие в данных сечениях продольных напряжений.

Анализируя напряженно-деформированное состояние металла на различных этапах формоизменения в очаге деформации, а также ранее представленные результаты, можно сказать следующее о влиянии схемы деформирования на развитие растягивающих напряжений в различных объемах прокатываемого металла.

Во-первых, действие осевых продольных растягивающих напряжений обусловлено неравномерным деформированным состоянием в металле на расстоянии

Данные о напряженном состоянии металла

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

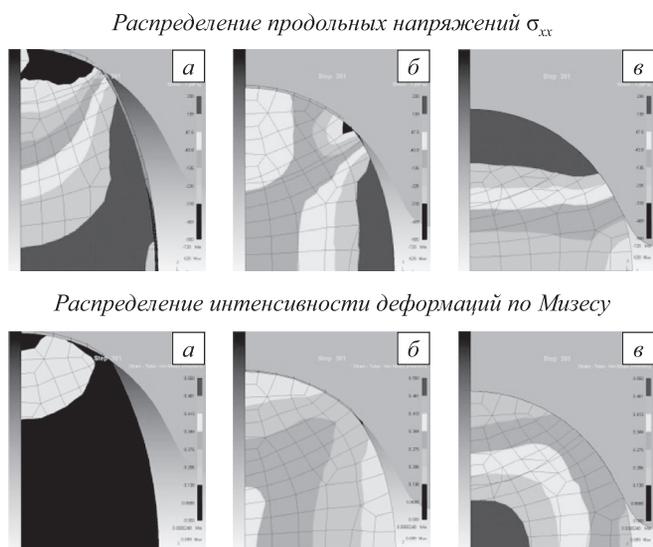


Рис. 3. Напряженно-деформированное состояние металла в различных сечениях очага деформации при прокатке по схеме овал – круг: *a* – сечение, находящееся на расстоянии 13 % от входа в очаг деформации; *b* – центр очага деформации; *c* – зона выхода

10 – 15 % от входа в очаг деформации. В этих сечениях заготовки деформация локализована в приконтактных слоях металла, 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).

Во-вторых, величина напряжений, действующих во внеконтактных зонах в разьеме калибра, зависит от соотношения исходной ширины полосы и калибра («степени охвата металла валками»). Чем меньше площадь неконтактной поверхности полосы с калибром, тем ниже соответствующие растягивающие напряжения.

В-третьих, продольные напряжения, возникающие в приконтактных слоях металла в выходной зоне 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).

В-четвертых, 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 этих напряжений зависит от площади контакта металла с валком в момент захвата. Чем больше контактная площадь в момент захвата, тем выше по значению продольные растягивающие напряжения в этой 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 станков. Проведен сравнительный анализ известных двух- и многовалковых систем калибров. Прокатка катанки по традиционно применяемой схеме овал – круг характеризуется наиболее высокими продольными растягивающими напряжениями, действующими во внеконтактных зонах по разьему 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 разьеме калибра и в зоне выхода из очага деформации. Установлено, что характер распределения напряжений в очаге деформации существенно зависит от формы и площади контактной поверхности, которая определяется формой задаваемого сечения и калибра. При прокатке в многовалковых системах калибров в осевой зоне прокатываемого металла ввиду всестороннего обжатия действуют высокие продольные растягивающие напряжения, величина которых зависит от степени заполнения предыдущего по ходу прокатки калибра, характеризующей площадь контакта металла с калибром на данном этапе формоизменения. При этом чем меньше эта контактная площадь, тем выше напряжения 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 напряженно-деформированного состояния в очаге деформации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Смирнов В.К., Шилов В.А., Инатович Ю.В. Калибровка прокатных валков: Учебное пособие для вузов. – М.: Теплотехник, 2008. – 490 с.
2. Филиппов Э.Л., Клименко В.М. // Изв. вуз. Черная металлургия. 1973. № 4. С. 105 – 108.

3. Эффективность деформации сортовых профилей / С.А. Тулупов, Г.С. Гун, В.Д. Онискив и др. – М.: Металлургия, 1990. – 280 с.
4. Поляков М.Г., Никифоров Б.А., Гун Г.С. Деформация металла в многовалковых калибрах. – М.: Металлургия, 1979. – 240 с.
5. Прокатка малопластичных металлов с многосторонним обжатием: Учебное пособие для вузов / Л.А. Барков, В.Н. Выдрин, В.В. Пастухов, В.Н. Чернышев. – Челябинск: Металлургия, Челябинское отделение, 1988. – 304 с.
6. Колмогоров В.Л. Механика ОМД. – М.: Металлургия, 1986. – 687 с.

© 2013 г. В.А. Харитонов, И.В. Таранин
Поступила 26 июня 2012 г.

УДК 621.926.2

А.Г. Никитин, Ю.А. Епифанцев, С.А. Лактионов, А.В. Витушкин

Сибирский государственный индустриальный университет

АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА СИЛУ ДРОБЛЕНИЯ ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ*

Аннотация. Проведен полнофакторный эксперимент по разрушению образцов из хрупкого материала. Показано влияние различных факторов и их взаимодействие на силу, необходимую для разрушения образцов, а также взаимосвязь этих факторов с величиной относительной деформации при разрушении. Даны рекомендации по выбору конструктивных параметров щековых дробилок.

Ключевые слова: хрупкий материал, разрушение, относительная деформация, скорость деформации, напряжение.

ANALYSIS OF FACTORS AFFECTING STRENGTH OF FRAGILE MATERIALS FRAGMENTATION

Abstract. Full-factor experiment of samples fragmentation made from fragile material is carried out. The influence of various factors and their interaction on the force necessary for samples fragmentation and the interconnection of these factors with magnitude of relative deformation at the fragmentation is shown. The recommendations for choice of parameters for jaw crushers are given.

Keywords: brittle material, destruction, relative strain, strain velocity, tension.

Расход энергии на дробление различных материалов составляет большую (до 5 %) долю в энергетическом балансе мира [1]. Многие промышленные производства (металлургические, горные и другие) перерабатывают в больших количествах сыпучие материалы различных классов крупности. В большинстве случаев нужна крупность достигается измельчением кусков на дробилках. Наиболее часто в промышленности используются щековые дробилки.

При создании новых дробильных машин или их совершенствовании необходимо иметь точные представления о процессе дробления. Для определения силы дробления для прочностного расчета деталей дробилки и теоретического выбора мощности электродвигателя необходимо учитывать по возможности все факторы, влияющие на нее.

При дроблении в щековых дробилках куски материала испытывают весь спектр деформаций (сжатие, изгиб, растяжение), но основным разрушающим видом нагрузки является напряжение растяжения, возникающее при раскалывании куска материала [2].

Цель настоящей работы – определение комплексного влияния на силу дробления прочности материала,

вида деформации материала и скорости приложения внешней силы. Последний фактор вызывает особый интерес, так как в объеме камеры дробления он характеризуется переменными значениями, а в литературных источниках не нашел отражения.

Эксперимент проводили на универсальной испытательной машине ИК-500.01, позволяющей в непрерывном режиме фиксировать силу давления на образец и его абсолютную деформацию, а также проводить видеозапись процесса разрушения.

Поскольку практически невозможно подобрать рудные куски с одинаковыми свойствами даже с одного месторождения, для чистоты эксперимента образцы кубической формы (40×40×40 мм) изготавливали из цементно-песчаной смеси при соотношении содержаний 1:1 и 1:2. Таким образом обеспечивали прочность материала образцов на двух уровнях.

Как показал предварительный эксперимент, вид деформации определяется характером контакта образца с рабочими поверхностями испытательной машины. При плоском контакте кубический образец испытывает деформацию сжатия (рис. 1, а), при линейном контакте по ребру кубика наблюдается деформация растяжения (рис. 1, б). При начальном точечном контакте такого образца (приложение нагрузки к вер-

* Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом Министерства образования и науки № 7.4662.2011.