

**Д. Л. Нестеренко, Д. В. Шевченко, А. И. Боровков**

Санкт-Петербургский государственный технический университет

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗНИЦЫ В СКОРОСТЯХ ВРАЩЕНИЯ ВАЛКОВ ОДНОЙ КЛЕТИ НА ПРОЦЕСС ПРОКАТКИ**

В ходе проведенных исследований была создана математическая и конечно-элементная модели системы валок–пластина, позволившие с достаточной точностью описать процессы, возникающие в ходе прокатки. Были получены графики зависимостей нормальных и касательных контактных напряжений от коэффициента трения. В ходе решения несимметричной задачи был получен график зависимости перемещений точек верхнего и нижнего краёв пластины. Были выделены и описаны характерные зоны, которые проходит металл в ходе прокатки. Было установлено, что даже небольшое различие в скоростях вращения валков одной клетки, которое может быть вызвано рассогласованием приводного механизма, разницей в диаметрах валков и другими причинами, приводит к значительному отклонению пластины от горизонтальной оси на выходе из очага деформации. Полученные результаты в дальнейшем могут быть использованы для оптимизации процесса продольной прокатки в гладких цилиндрических валках.

**Ключевые слова:** метод конечных элементов, продольная прокатка, коэффициент трения, скорость вращения, контактное давление.

### **Введение**

В XXI веке прокатка металлов остаётся одним из основных способов обработки металлов давлением. Прокатка металлов – способ обработки металлов и металлических сплавов давлением – состоит в обжатии их между вращающимися валками прокатных станов [1].

В работе рассмотрен самый распространённый вид прокатки – продольная прокатка в гладких цилиндрических валках. При проходе металла между валками высота его сечения уменьшается, а длина и ширина увеличиваются. При нормальных условиях в процессе прокатки толщина исходной полосы  $h_0$  по всей ширине и длине одинакова, зазор между валками  $h_1$  по всей длине бочки валков и сопротивление деформации прокатываемого металла по всему его объёму также одинаковы. Наблюдающиеся почти всегда отклонения от этих условий приводят к неравномерной деформации, которая также может быть вызвана несогласованным вращением валков и процессами, происходящими в очаге деформации – той части полосы, которая в данный мо-

мент подвергается пластической деформации. Различают неравномерность деформации по ширине, толщине и длине полосы.

На протяжении трёх столетий процесс прокатки непрерывно оптимизируется: улучшается качество изделия на выходе, уменьшаются энергетические затраты. Однако любые натурные эксперименты в этой области связаны со значительными экономическими затратами, что осложняет и замедляет исследовательский процесс. Теоретические же исследования не позволяют всесторонне описать все происходящие в процессе прокатки явления. Поэтому актуальным является вопрос создания адекватной конечно-элементной (КЭ) модели, которая позволит, оперативно меняя параметры прокатки, как можно более полно исследовать возникающие в ходе ее процессы и явления.

Целью работы является создание адекватной КЭ-модели, позволяющей описать известные из литературы эффекты, возникающие в процессе прокатки, а также выявить новые. В частности, на основе созданной КЭ-модели предполагается выявить и описать влияние скорости вращения валков и коэффициента трения между валками и прокатываемой полосой на напряжённо-деформированное состояние в очаге деформации. Проведённые исследования помогут лучше понять природу процесса прокатки и причины возникновения неравномерности деформаций.

### **1. Исследование влияния сил трения на распределение контактных сил в процессе прокатки**

В ходе проведенного КЭ-исследования рассматривался процесс прокатки листа стали при температуре 400°C. Движение металла при входе и выходе равномерное. Оба валка приводные, валки обладают одинаковыми окружными скоростями и диаметрами, а металл по своим механическим свойствам однороден. Ширина прокатываемой полосы много больше её толщины, поэтому задача решалась в плоскодеформированной постановке. В качестве металла проката была выбрана сталь Ст3. В качестве математической модели, описывающей механическое поведение стали, использовалась билинейная модель пластичности с упрочнением. В качестве материала валков была выбрана сталь 50X. Для описания механического поведения этого материала использовалась линейно-упругая математическая модель.

В программной системе КЭ-анализа ANSYS был смоделирован процесс прокатки, включая захват полосы металла валками. Валки диаметром 0,5 м вращаются с постоянной угловой скоростью 15°/с. Под действием начальной скорости полоса металла подаётся в межвалковое пространство, где захватывается валками за счёт сил трения и подвергается обжатию с  $h_{in} = 10$  см (толщина на входе в межвалковое пространство) до  $h_{out} = 8$  см (толщина на выходе) при величине относительного обжатия  $\left(\frac{\Delta h}{h_{in}} 100\%\right) = 20\%$ .

В теории прокатки очагом деформации называют ту часть полосы, которая в данный момент времени подвергается пластической деформации. На рис. 1, а представлен возникающий в процессе прокатки очаг деформаций, полученный в ходе решения задачи. Анализируя полученное поле пластических деформаций, в нём можно выделить «ядро деформации» и зоны затруднённой деформации. Полученные результаты качественно совпадают с теоретическими данными (рис. 1, б) [1].

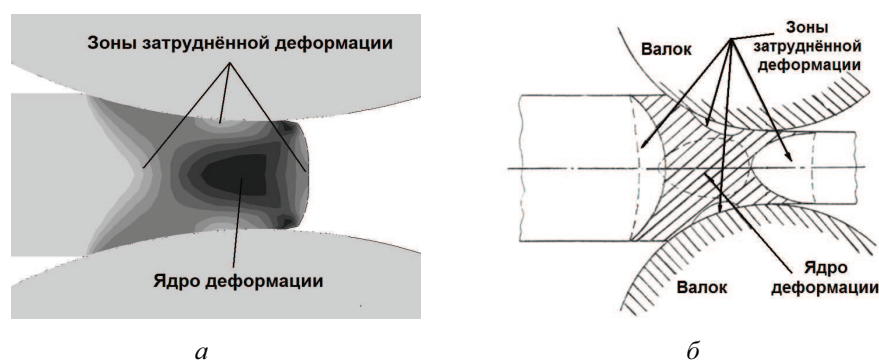


Рис. 1. Вид очага деформации в поле интенсивности пластических деформаций: а – полученный в ходе решения задачи; б – теоретический [1]

В настоящее время установлено, что распределение давлений по дуге контакта зависит от условий прокатки, и в первую очередь от коэффициента трения  $f$  и фактора формы  $l_d / h_{cp}$  ( $h_{cp}$  – средняя высота прокатываемой полосы,  $l_d$  – длина дуги контакта), который характеризует степень обжатия [2].

На рис. 2 приведены типичные эпюры распределения давлений  $P$  по дуге контакта при прокатке толстых (а), средних (б) и тонких (в) полос.

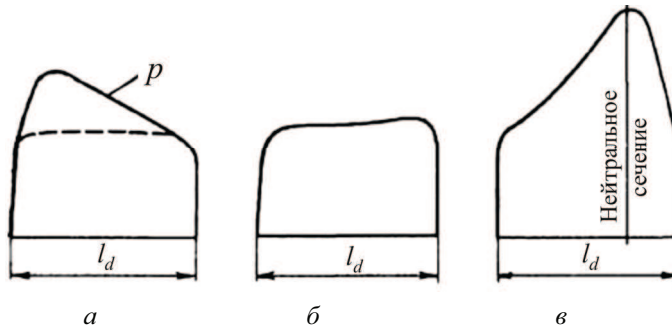


Рис. 2. Эпюры нормального контактного давления

При малых значениях параметра  $l_d / h_{cp} < 1$  давление имеет максимальное значение вблизи плоскости входа (рис. 2, а). В интервале  $1 < l_d / h_{cp} < 1,5$  давление распределяется по дуге контакта приблизительно равномерно (рис. 2, б). При более высоких значениях фактора формы ( $l_d / h_{cp} > 3$ ) (тонкие полосы) на эпюрах давления появляется отчетливо выраженный пик, расположенный ближе к выходу из очага деформации (рис. 2, в) [3].

Экспериментальные данные показывают, что при постоянном значении фактора формы высота пика на эпюре давлений возрастает с увеличением коэффициента трения (рис. 3).

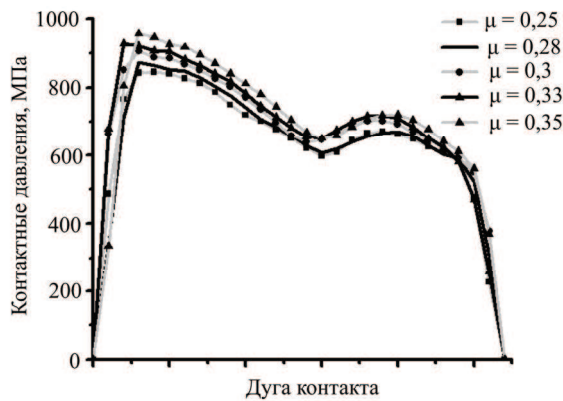


Рис. 3. Распределение нормальных контактных напряжений

В рассматриваемой задаче значение фактора формы  $l_d / h_{cp} = 0,8$ . Максимум контактного давления смещён к входу металла в очаг де-

формации, что характерно для значения фактора формы  $l_d / h_{cp} < 1$ . На графике распределения контактных давлений (см. рис. 3) отчётливо наблюдается двойной пик. Ли и Кобаяши [4] было установлено, что наличие двойного пика зависит от геометрических параметров системы валок–пластина согласно формуле

$$H = \frac{R}{h_{in}} \left[ \frac{h_{in} - h_{out}}{h_{in}} \right],$$

где  $h_{in}$  – толщина пластины на входе,  $h_{out}$  – на выходе, а  $R$  – радиус вала. Так, при  $H < 3$  график распределения контактных давлений имеет два пика, а при  $H > 3$  – один. При данных геометрических параметрах системы  $H = 2,25 < 3$  график распределения контактного давления имеет двойной пик, что подтверждает адекватность созданной КЭ модели.

На рис. 4 представлены графики распределения касательных напряжений на контактной поверхности по дуге контакта для различных коэффициентов трения. Из рис. 4 видно, что при увеличении коэффициента трения касательные напряжения возрастают по модулю, а нейтральное сечение (точка, соответствующая нулевому значению касательных напряжений) смещается в сторону направления прокатки (рис. 5), что соответствует экспериментальным данным [2].

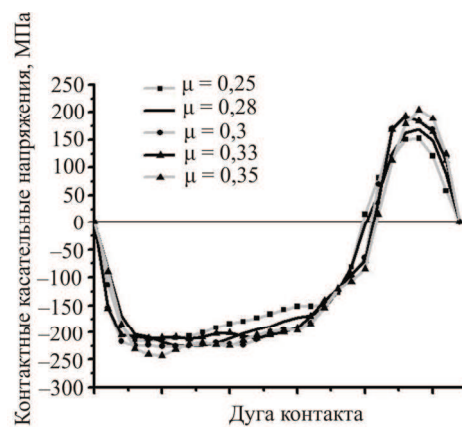


Рис. 4. Распределение касательных контактных напряжений

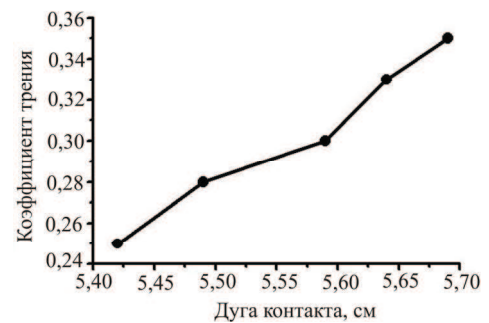


Рис. 5. График зависимости положения нейтрального сечения на дуге контакта от коэффициента трения

## 2. Исследование влияния разницы в скоростях вращения валков одной клетки на процесс прокатки в гладких валках

В ходе проведенного исследования рассматривался процесс несимметричной прокатки листа стали двумя парами гладких цилиндрических валков. Движение металла при входе и выходе равномерное, все 4 валка приводные, валки обладают одинаковыми диаметрами, но разными скоростями вращения. Верхним валкам задана угловая скорость  $60^{\circ}16'/\text{с}$ . Нижним валкам задана скорость на 1 % больше, чем верхним, то есть  $60^{\circ}76'/\text{с}$ .

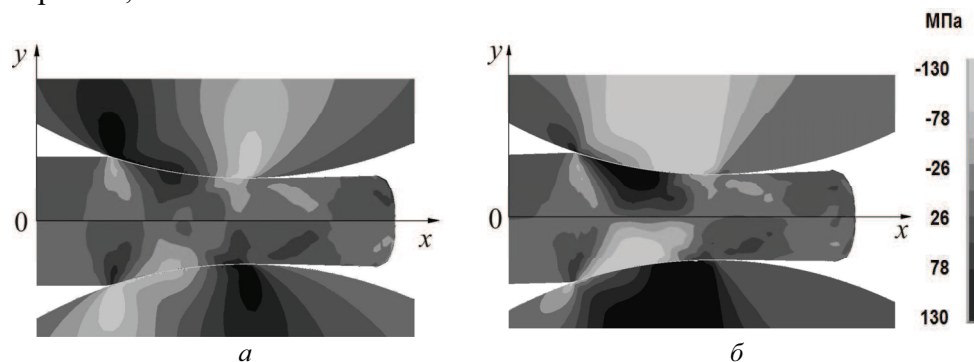


Рис. 6. Распределение касательных напряжений

Различие в скоростях вращения валков отразилось на распределении компонента тензора напряжений  $\tau_{xy}$  в очаге деформации (рис. 6). На рис. 6, *a* показан очаг деформации для случая, когда валки вращаются с одинаковыми скоростями, на рис. 6, *б* – с разными. Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что даже незначительное различие в скоростях вращения валков приводит к качественному изменению распределения компонента тензора напряжений  $\tau_{xy}$  в очаге деформации: в верхнем валке увеличивается зона отрицательных касательных напряжений, а в нижнем – положительных. Различие в скоростях вращения верхних и нижних валков привело к отклонению листа от горизонтальной оси на выходе из межвалкового пространства. В рассматриваемой задаче при расстоянии между центрами валков 1,5 м отклонение достигло значительной величины – 6,1 см.

При большей разнице в скоростях вращения валков одной клетки может возникнуть ситуация, когда слишком большое отклонение от горизонтальной оси не позволит пластине войти во второе межвалко-

вое пространство, пластина изогнётся и нарушит нормальный ход процесса прокатки. Подобные случаи требуют дополнительного изучения.

На рис. 7 представлен график зависимости вертикальных компонентов вектора перемещений, возникающих в точках верхнего и нижнего краёв пластины в ходе прокатки.

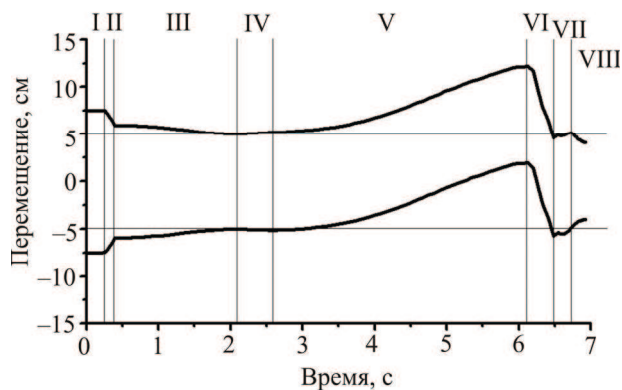


Рис. 7. График зависимости вертикальных компонент вектора перемещений

Анализируя представленный график, можно выделить несколько характерных временных отрезков, которые проходит металл в ходе прокатки. Отрезок I соответствует времени свободного горизонтального движения пластины до соприкосновения с валками. В зоне II происходит интенсивное обжатие под действием начальной скорости пластины. Зона III отражает процесс захвата пластины валками при помощи силы трения. В зоне IV пластина упруго восстанавливается и выходит из межвалкового пространства. В зоне V пластина движется ко второй паре валков, изгибаясь вследствие различия в скоростях вращения валков. Войдя в контакт на границе двух зон, пластина стремительно увлекается вниз (зона VI) и втягивается во второе межвалковое пространство (зона VII). Последняя, VIII, зона соответствует обжатию пластины второй парой валков.

При прохождении зон VI–VIII пластина встречает значительное сопротивление (рис. 8, а) и преодолевает этот отрезок примерно за одну секунду. В это время непрерывно продолжается подача металла в пространство между двумя парами валков. Не имея возможности свободно двигаться вперед, металл начинает изгибаться (рис. 8, б).

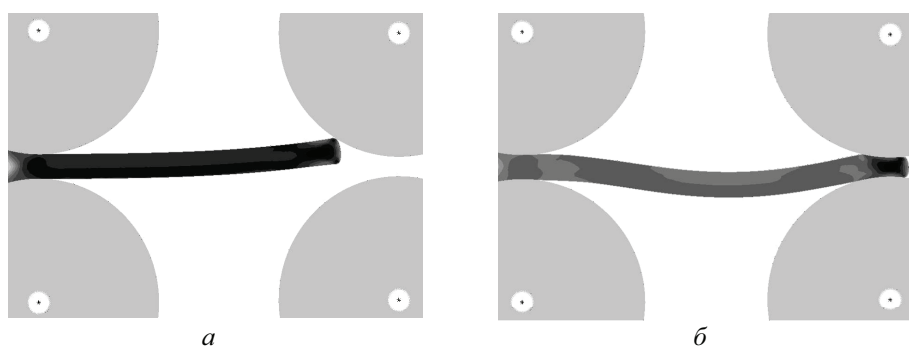


Рис. 8. Вид пластины в разные моменты времени

Это может привести к накоплениям дополнительных деформаций и даже «загибанию» пластины. Помимо более точной синхронизации скоростей вращения валков одной пары, в качестве одного из способов борьбы с этим явлением, можно предложить увеличение скорости вращения второй пары валков, которое вызовет натяжение листа между парами валков.

### Заключение

В ходе работы была создана конечно-элементная модель системы валок–пластина, позволившая с достаточной точностью описать представленные в литературе процессы, возникающие в ходе прокатки. Были получены графики зависимости нормальных и касательных контактных напряжений от коэффициента трения. В ходе решения несимметричной задачи был получен график зависимости вертикальных компонентов вектора перемещений точек верхнего и нижнего краёв пластины, выделены и описаны характерные зоны, которые проходит металл в ходе прокатки. Было установлено, что даже небольшое различие в скоростях вращения валков одной клетки, которое может быть вызвано рассогласованием приводного механизма, разницей в диаметрах валков и другими причинами, приводит к значительному отклонению пластины от горизонтальной оси на выходе из очага деформации. Полученные результаты в дальнейшем могут быть использованы для оптимизации процесса продольной прокатки в гладких цилиндрических валках.

### Библиографический список

1. Пресняков А.А. Очаг деформации при обработке металлов давлением. – Алма-Ата: Наука, 1988. – 136 с.



2. Процесс прокатки / М.А.Зайков В.П.Полухин, А.М.Зайков, Л.Н.Смирнов. – М.: Изд-во Моск. ин-та стали и сплавов, 2004.

3. Технология процессов обработки металлов давлением / П.И. Полухин, А.А. Хензель, В.П. Полухин [и др.] / под ред. П.И. Полухина. – М.: Металлургия, 1988.

4. Shahani A.R., Nodamaie S.A. and Salehinia I. Parametric Study of Hot Rolling Process by the Finite Element Method. – Sharif University of Technology, 2009.

Получено 21.03.2011