

И.Ю.Приходько, М.А.Дедик

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА НЕСИММЕТРИЧНОЙ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ ПОЛОС МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Исследуются параметры процесса несимметричной холодной прокатки полос с использованием метода конечных элементов (МКЭ). Выполнено сравнение силовых параметров процессов симметричной и несимметричной холодной прокатки полос. Смоделированы особенности (периодическое изменение) напряженно-деформированного состояния полосы на входе и выходе из очага деформации (ОД) для случаев процессов симметричной и несимметричной прокатки. Разработанная модель, основанная на МКЭ, позволяет разрабатывать эффективные режимы несимметричной прокатки.

несимметричная прокатка полос, напряженно-деформированное состояние, очаг деформации, силовые параметры, метод конечных элементов

Состояние вопроса и задачи исследования. В науке и технике почти всегда возникает необходимость расчета систем, имеющих сложную геометрическую конфигурацию и неоднородную физическую структуру. С помощью компьютеров такие расчеты выполняются, как правило, с использованием приближенных численных методов. К таким методам относятся метод конечных разностей и метод конечных элементов. Построение конечно-разностных расчётных схем обычно требует небольшого объема вычислений, как правило, значительно меньшего, чем в МКЭ. Однако достоинствами МКЭ являются гибкость и разнообразие сеток, стандартные приемы построения дискретных задач для произвольных областей, простота учета краевых условий. Кроме того, математический анализ МКЭ является более простым, его методы применимы к более широкому классу задач, а оценки погрешностей приближенных решений, как правило, получаются при менее жестких ограничениях, чем в методе конечных разностей.

Основой для исследования методом конечных элементов послужили фундаментальные результаты, связанные с анализом сходимости и устойчивости конечно-разностных схем, проекционных методов, обобщенных решений [1]. Практически все современные расчёты на прочность проводят, используя МКЭ, который на сегодняшний день реализован во множестве мощных программных пакетов (ANSYS, LSDYNA[1], ABAQUS, SolidWork, DEFORM-2D/3D, ПК Лира).

Моделирование и расчеты параметров несимметричной прокатки полос проводили с использованием явного метода анализа, применимого для моделирования быстропротекающих нелинейных процессов, таких как прокатка, ковка, выдавливание, удар, волочение и др.

Цель работы и постановка задачи. Целью данной работы являлась разработка конечно-элементной модели процесса холодной прокатки

полос, учитывающей комплекс параметров несимметричности процесса, и позволяющей прогнозировать форму прокатанной полосы.

Изложение основных результатов исследования. С развитием вычислительной техники все большее значение приобретают численные методы расчёта параметров процессов прокатки [2]. В настоящее время расчётами энергосиловых, кинематических и других параметров процессов прокатки полос методом конечных элементов занимаются многие отечественные и зарубежные ученые, в частности, авторы работ [3,4].

В реальном производственном процессе прокатка тонких полос происходит в несимметричных условиях, связанных с действием различных факторов. Поэтому процесс симметричной прокатки является идеализированным (частным) случаем несимметричной прокатки полос.

Для описания реологии материала полосы при деформировании использовалась упругопластическая модель, учитывающая изменение напряжения текучести в зависимости от степени и скорости деформации. Учитывали упругие свойства валков и полосы (модуль упругости 210 ГПа, коэффициент Пуассона 0,3). Радиус валков 300 мм, их угловая скорость 8,3 рад/с, плотность материала 7870 кг/м³. Ширина полосы 100 мм (принята на порядок меньшей, чем обычная ширина полос, прокатываемых на промышленных широкополосных станах, с целью ускорения решения задачи). Толщина полосы на входе 2 мм, исходный предел текучести материала полосы $\sigma_{исх}=220$ МПа. Коэффициент (A) и показатель (b) упрочнения материала полосы в зависимости ($\sigma=\sigma_{исх}+A\varepsilon^b$) напряжения текучести (σ) от истинной деформации (ε): $A=560$ МПа и $b=0,283$; коэффициенты модели Купера–Саймондса ($1+(\frac{u}{C})^p$) влияния скорости деформации (u) для низкоуглеродистой стали: $C=40$, $p=5$; коэффициент вязкого демпфирования 20% от критического значения коэффициента демпфирования [1] (используется для того, чтобы при моделировании избежать нежелательных колебаний в контакте вала с полосой при динамическом захвате полосы и в процессе прокатки).

Приняли, что трение в контакте между валком и полосой подчиняется закону Амонтона–Кулона. Коэффициент трения 0,07. Схема разбиения валка и полосы на конечные элементы при моделировании процесса прокатки приведена на рис. 1.

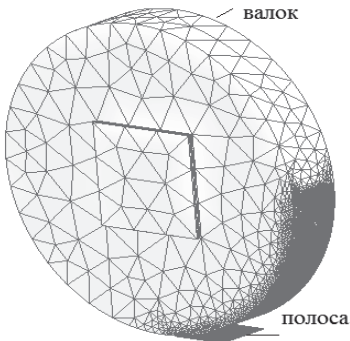


Рис. 1 Схема разбиения валка и полосы на конечные элементы

Для подачи полосы в валки ей сообщалась начальная скорость 2,5 м/с. Моделировали процесс заполнения очага деформации и процесс прокатки без натяжения в интервале времени $t = 0 \dots 0,075$ с. Степень деформации 12%.

Результаты моделирования позволили определить напряженно–деформированное состояние полосы в очаге деформации (рис.2), что в целом соответствует известным экспериментальным данным [5,6].

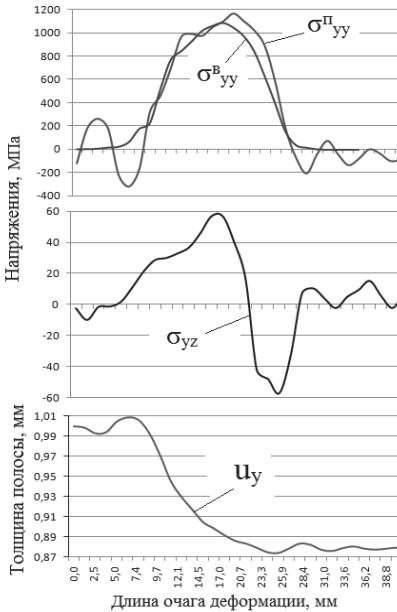


Рис.2. Напряженно–деформированное состояние в узле поверхностного слоя полосы. u_y – перемещение узла вдоль вертикальной оси (по толщине полосы, мм) σ_{yy}^B – нормальные напряжения на поверхности вала; $\sigma_{yy}^п$ – вертикальные напряжения в полосе; σ_{yz} – касательные напряжения на поверхности контакта.

При малом отношении длины очага деформации к средней толщине полосы в ОД ($l_c/h_{cp} = 6 \dots 15$) имеют место периодические изменения вертикальных напряжений в полосе на входе и выходе из очага деформации (рис.2; $l_c/h_{cp} = 7,92$). Подобное изменение вертикальных напряжений в ОД показано и в работе [7] (см., например, рис.3).

Появление выраженных периодических изменений вертикальных напряжений во входной и выходной зонах ОД объясняется наличием линий сдвига в ОД (где скорость деформации наибольшая), пересекающих друг друга с образованием узлов.

С уменьшением l_c/h_{cp} до 5 и менее периодические изменения вертикальных напряжений могут происходить по всему ОД. Периодическое изменение вертикальных напряжений в очаге деформации и во внеконтактных зонах вблизи ОД ранее экспериментально фиксировалось [6]. В процессе прокатки на выходе из валков происходит упругое восстановление полосы, и её толщина незначительно увеличивается (рис.2). Как и в случае с входной областью ОД, на выходе также присутствуют менее выраженные периодические изменения нормальных напряжений.

Известно, что при прокатке полос контактные напряжения по ширине полосы распределены неравномерно. У кромок они достигают максимального значения за счет резкого изменения упругого сплющивания валков в переходной области у кромок.

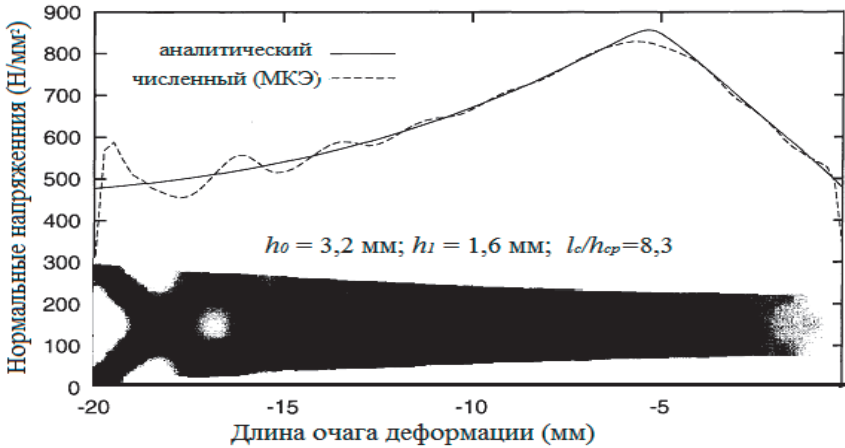


Рис.3. Распределение контактного давления в очаге деформации [6]. В нижней части рисунка градициями серого цвета показано качественное распределение скорости деформации в ОД

Такая неравномерность способствует нарушению плоскостности прокатываемой полосы – прикромочной волнистости. На рис.4 показано распределение контактных эквивалентных напряжений по Мизесу по ширине полосы. Из рис.4 следует, что у кромок напряжения имеют максимальные значения 676 МПа, а в центре 473 МПа.

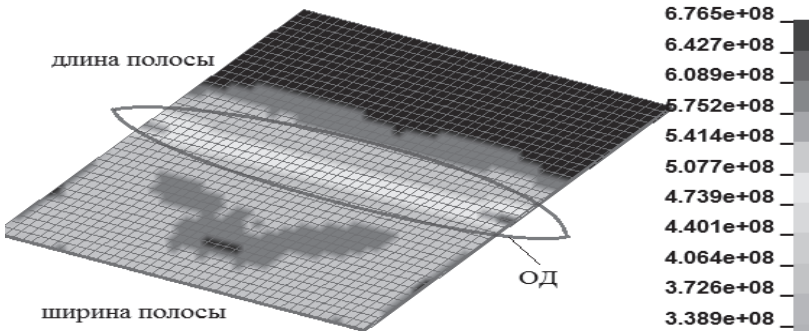


Рис.4. Поля эквивалентных напряжений по Мизесу в полосе в процессе прокатки. Шкала градаций серого цвета в Па.

Энергосиловые параметры процесса прокатки определяют производительность, удельную энергоёмкость процесса прокатки и оказывают влияние на качество тонколистовой продукции. Их снижение при прочих равных условиях процесса прокатки достигается различными известными методами – уменьшением контактного трения, диаметра

рабочих валков, повышением натяжения, а также путём организации несимметричного процесса прокатки. При несимметричном процессе прокатки в очаге деформации возникает зона, в которой силы трения на верхнем и нижнем валках направлены в разные стороны. Их действие приводит к снижению энергосиловых параметров процесса по сравнению с симметричной прокаткой.

При моделировании несимметричного процесса прокатки использовали те же допущения, что и в случае симметричной прокатки. Рабочие валки моделировали с помощью абсолютно жестких оболочечных элементов. Несимметрию в процесс прокатки вносили путём использования рабочих валков различного диаметра, различных их скоростей вращения и коэффициента трения на контактных поверхностях валков и полосы. Сравнительный анализ контактных напряжений и силовых условий симметричной и несимметричной холодной прокатки выполняли при равных средних значениях диаметра валков, окружной их скорости и коэффициента трения на поверхностях контакта. Исходные и конечные геометрические размеры полосы, а также закономерности изменения реологических свойств материала полосы при деформировании принимали такими же, как при моделировании симметричного процесса. Учитывали упругие свойства валков и полосы (модуль упругости 210 ГПа, коэффициент Пуассона 0,3). Радиус нижнего валка – 200 мм, верхнего – 400 мм, их угловая скорость, соответственно, 12,5 рад/с и 6,25 рад/с. Коэффициенты трения для контактов верхнего и нижнего валков с полосой, соответственно, 0,08 и 0,06. Степень деформации составляла 40%.

Обжатие полосы со стороны валка меньшего диаметра (верхнего) больше, чем обжатие со стороны валка большего диаметра (нижнего), что известно. Сила прокатки при симметричном процессе $P_c=1\text{МН}$ (сравнение данных проводилось при использовании абсолютно жестких валков в обоих случаях), а при несимметричном $P_n=0,913\text{МН}$ (на 8,7% меньше), что также соответствует экспериментальным данным о том, что сила прокатки в случае несимметричного процесса в близких условиях процесса на 5–10% меньше [8].

Известно, что при значительном различии диаметров валков и (или) рассогласовании угловых скоростей, а также коэффициентов трения на поверхностях контакта валков и полосы характер искривления полосы на выходе из ОД (по экспериментальным данным) приобретает осцилляционный характер [2]. В результате моделирования несимметричной прокатки была определена продольная кривизна полосы после прохода ее через валки (рис.5).

Исследовали историю перемещения узла передней кромки полосы по вертикальной оси в зависимости от времени. Характер изменения искривления переднего конца полосы во время прокатки представлен на рис.6, что подтверждает известные экспериментальные данные.

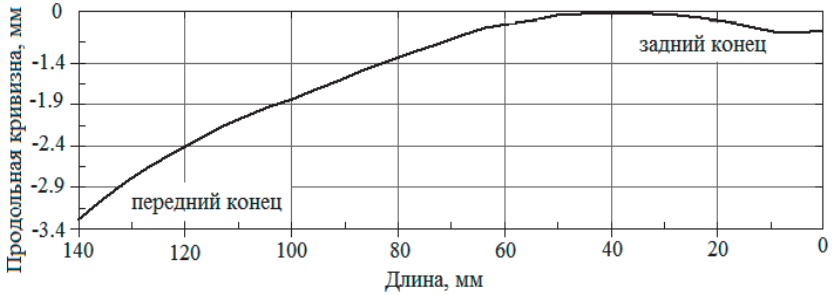


Рис.5. Продольная кривизна полосы после прокатки

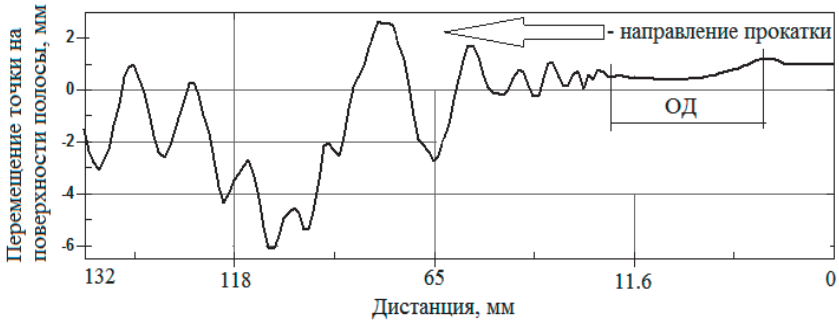


Рис.6. Вертикальное перемещение точки на поверхности вблизи переднего конца полосы в процессе несимметричной прокатки

Имеющиеся в настоящий момент иные математические методы для исследования кривизны полосы при несимметричной прокатке, например, метод линий скольжения [2], имеют ограничение, связанное с тем, что ими можно пользоваться при малом рассогласовании угловых скоростей валков и различии их диаметров. Поэтому применение метода конечных элементов для исследования динамики изменения кривизны полосы в процессе прокатки является выгодной единственной альтернативой методу физического моделирования. Его практическая ценность в данном случае связана с возможностью разработки систем управления плоскостностью полос и устранения ситуаций, когда выходящая из валков полоса искривляется (образуется дефект её формы), при этом передний ее конец может застревать в выходной проводке или между роликками рольганга.

Выводы.

1. Разработанная математическая модель позволяет учитывать условия несимметричности процесса прокатки (диаметры валков, их скорость вращения, условия трения). Результаты решения позволяют определять напряженно-деформированное состояние валков и полосы в очаге деформации, толщину и скорость полосы в очаге деформации, а также ее форму в зависимости от различных факторов.

2. Модель позволяет исследовать закономерности периодического изменения вертикальных напряжений во входной зоне очага деформации и на выходе из него, что объясняется наличием линий сдвига в ОД (где скорость деформации наибольшая), пересекающих друг друга с образованием узлов. Вследствие локального утолщения полосы на входе в валки, а также упругого восстановления её на выходе вертикальные напряжения в полосе могут быть растягивающими, то есть принимать отрицательные значения. Результаты моделирования качественно подтверждаются экспериментальными данными, полученными различными авторами.

3. Применение разработанной конечноэлементной модели процесса прокатки позволяет рассматривать как обычные, так и отдельные нестандартные случаи процесса прокатки, давать численную оценку эффектам неблагоприятного формоизменения полосы на выходе из валков и отыскивать предупреждающие решения. Анализ напряженно-деформированного состояния валков и полосы позволяет разрабатывать эффективные режимы прокатки с позиций повышения точности полос по толщине, улучшения плоскостности, снижения удельной энергоёмкости процесса прокатки.

1. *Hallquist J.O./ LS-DYNA Theoretical Manual*// – Livermore: LSTC, 1998. – 497 p.
2. *Мазур В.Л., Ноговицын А.В.* /Теория технология тонколистовой прокатки. // Д.: РИА «Днепр-VAL», 2010. – 500с.
3. *Пархоменко Д.А., Черченко П.П., Штукун Д.А., Сатонин А.В.* / Двумерное математическое моделирование напряженно-деформированного состояния металла при прокатка относительно тонких лент и полос. Тематический сборник научных работ //– ДГМА, Краматорск. 2004. –С.405–408.
4. *Galantucci, L.M. and Tricarico, L.* // Thermo-mechanical simulation of a rolling process with an FEM approach", J. Material Processing Technology, 92–93, pp. 494–501 (1999).
5. *Грудев А.П.* / Теория прокатки. // М.: Металлургия. 1988г. 240с.
6. *Palme, R.B.; McGregor, C.W.* /Rolling of Metals, ASME Research Committee Plastic Flow of Metals //, New York, 1958.
7. *Pawelski H.* / Interaction between mechanics and tribology for cold rolling of strip with special emphasis on surface evolution. // Technische Uniersitat Bergakademie Freiberg. 2004. – 304pp.
8. *Синицын В.Г.* /Несимметричная прокатка листов и лент. // М.: Металлургия. 1984г. 167с.

Статья рекомендована к печати докт.техн.наук С.А.Воробьем

Приходько І.Ю., Дедік М.О.

Дослідження параметрів процесу несиметричної холодної прокатки штаб методом кінцевих елементів

Досліджуються параметри процесу несиметричної холодної прокатки штаб за допомогою методу кінцевих елементів (МКЕ). Виконано порівняння силових параметрів симетричної і несиметричної холодної прокатки штаб. Змодельовано особливості (періодичні зміни) пружно-деформованого стану штаби на вході і виході з осередку деформації (ОД) для випадків процесів симетричної і несиметричної прокатки. Розроблена модель, що заснована на МКЕ, дозволяє розробляти ефективні режими несиметричної прокатки.