

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА ПРИ ПРОКАТКЕ ЗАГОТОВОК С НЕРАВНОМЕРНЫМ ТЕМПЕРАТУРНЫМ ПОЛЕМ

Кулик Т. А., Кулик Н. А.

Реализация технологических процессов прокатки, отличающихся неравномерным температурным полем заготовок, характеризуется наличием несимметричности механических свойств по толщине, что свидетельствует о целесообразности всестороннего анализа процессов, как с точки зрения энергосиловых параметров, так и с точки зрения механизмов дефектообразования и методов их устранения. Разработана конечно-элементная модель, позволяющая изучить влияние неравномерного распределения температурного поля по толщине заготовки на ее результирующую кривизну. Данная модель может быть использована для оценки эффективности предложенной технологической настройки и режимов работы стана в каждом конкретном случае.

Реалізація технологічних процесів прокатки, що відрізняються нерівномірним температурним полем заготовок, характеризується наявністю несиметричності механічних властивостей по товщині, що свідчить про доцільність всебічного аналізу процесів, як з точки зору енергосилових параметрів, так і з точки зору механізмів дефектоутворення і методів їх усунення. Розроблено кінцево-елементну модель, що дозволяє вивчити вплив нерівномірного розподілу температурного поля по товщині заготовки на її результируючу кривизну. Дана модель може бути використана для оцінки ефективності запропонованого технологічного налаштування і режимів роботи стану в кожному конкретному випадку.

Implementation of process rolling from an uneven temperature field, characterized by asymmetry of the mechanical properties on thickness, indicating into the feasibility of a comprehensive analysis of the processes both in terms of power parameters, and from the point of view of the mechanisms of defect formation and methods to address them. The finite element model, which allows to study the influence of uneven distribution of the temperature field through the thickness of the workpiece on its resultant curvature is developed. This model can be used to assess the effectiveness of the proposed technological adjustment modes mill in each case.

Кулик Т. А.

Кулик Н. А.

канд. техн. наук ДГМА;  
orp@dgma.donetsk.ua  
ассистент ДГМА  
mto@dgma.donetsk.ua

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

УДК 621.771.01

Кулик Т. А., Кулик Н. А.

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА ПРИ ПРОКАТКЕ ЗАГОТОВОК С НЕРАВНОМЕРНЫМ ТЕМПЕРАТУРНЫМ ПОЛЕМ

Одним из технических решений по расширению сортамента и повышению качества готовой металлопродукции, производимой в рамках различных технологических схем обработки давлением, является более широкое использование процессов теплового деформирования. И если процесс прокатки монометалла достаточно полно изучен с точки зрения определения интегральных и локальных характеристик в диапазоне холодного или горячего деформирования, то наличие несимметричности механических свойств по толщине, связанная с неравномерностью нагрева заготовок, свидетельствует о целесообразности всестороннего анализа процессов прокатки листов с неравномерным температурным полем, как с точки зрения энергосиловых параметров, так и с точки зрения механизмов дефектообразования и методов их устранения.

В настоящее время область применения метода конечных элементов очень обширна и охватывает все физические задачи, которые могут быть описаны дифференциальными уравнениями. Наиболее важным преимуществом метода конечных элементов, благодаря которым он широко используется, являются то, что свойства материалов смежных элементов не должны быть обязательно одинаковыми [1]. Это позволяет применить метод к решению данной задачи.

Исходя из вышесказанного, в качестве метода математического моделирования был принят метод конечных элементов в его программной интерпретации в пакете Abaqus [2].

Постановка и решение задачи моделирования разбивались на два шага. Первым шагом в данном случае является зажатие листа рабочими валками прокатного стана. Следующий шаг заключается во вращении рабочих валков и реализации непосредственно процесса прокатки. При анализе рабочие валки моделировались как абсолютно жесткие аналитические поверхности, лист моделировался четырехузловыми твердотельными элементами с плоской деформацией и редуцированной схемой интегрирования. При решении задачи пренебрегали динамическими явлениями захвата металла валками, что существенно снизило время расчета. При анализе время каждого приращения (часть истории анализируемого процесса) ABAQUS/Standard автоматически выбирает параметры сходимости и приращение времени, требуемые для данного шага [2]. Такой подход является высокоэффективным для нелинейных задач, потому что отклик модели может значительно изменяться на каждом шаге. Автоматическое управление приращением времени шага позволяет решать нелинейные задачи, к которым следует отнести анализ процессов обработки металлов давлением, не имея исчерпывающей информации о поведении моделируемой конструкции.

Целью данной работы является изучение влияния неравномерного распределения температурного поля по толщине заготовки на ее результирующую кривизну.

В данной статье представлены расчеты для листа 30ХГСА ( $h_0 = 40$ ), имеющего асимметричное распределение температур по высоте ( $T_1 > T_2$ ), в условиях черновой клетки стана 2800 ( $R_{раб} = 700$ ). Производили шесть расчетов. Первый расчет произвели для изотермического случая с постоянной температурой  $900^\circ\text{C}$ . В последующих расчетах принимали перепады температур  $910 - 890^\circ\text{C}$ ,  $920 - 880^\circ\text{C}$ ,  $930 - 870^\circ\text{C}$ ,  $940 - 860^\circ\text{C}$  и  $950 - 850^\circ\text{C}$  для 2-го, 3-го, 4-го, 5-го и 6-го расчета соответственно (рис. 1), при этом средняя температура полосы в каждом случае оставалась  $T_{cp} = 900^\circ\text{C}$  (рис. 1).

Результатами математического моделирования являются распределение напряжений и деформаций материала листа, как по его длине, так и толщине, изменения силы и моментов прокатки, а также производили анализ результирующей геометрии листа.

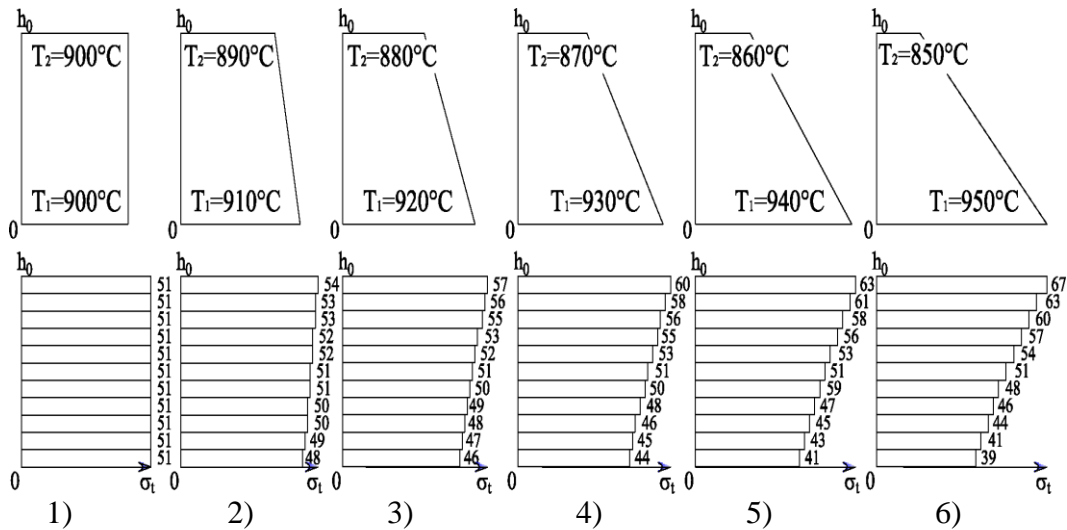


Рис. 1. Исходное распределение температуры и механических свойств по толщине заготовки

Исследования показывают, что величина момента прокатки на валке, соприкасающимся с более нагретой поверхностью (более мягкой), имеет более высокое значение, чем на валке, соприкасающемся с менее нагретой. Эти данные совпадают с выводом А. И. Целикова [3] о том, что для вращения валка, соприкасающегося с более мягкой частью полосы, требуется несколько больший момент, чем для вращения другого валка, сделанного в предположении одинакового характера распределения контактных напряжений по дуге захвата у верхнего и нижнего валков (рис. 2). При этом равенство значений средних температур во всех расчетах обуславливает одинаковую силу прокатки (рис. 3).

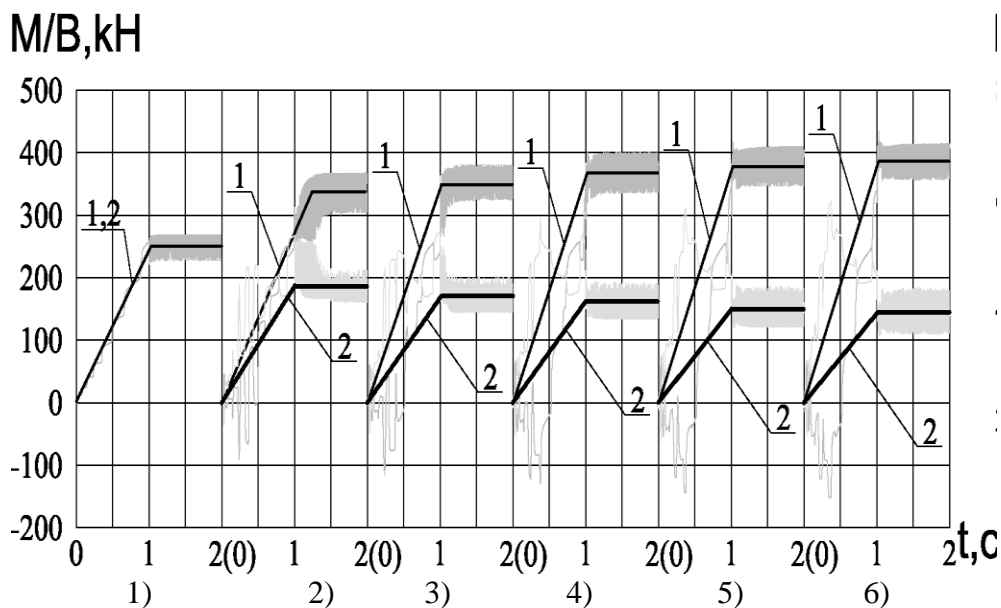


Рис. 2. Расчетные распределения, приведенные к единице ширины, момента : 1)  $T=900^{\circ}C$ ; 2) перепад температур  $910-890^{\circ}C$ ; 3) перепад температур  $920-880^{\circ}C$ ; 4) перепад температур  $930-870^{\circ}C$ ; 5) перепад температур  $940-860^{\circ}C$ ; 6) перепад температур  $950-850^{\circ}C$  (нумерация валков: 1 – нижний; 2 – верхний).

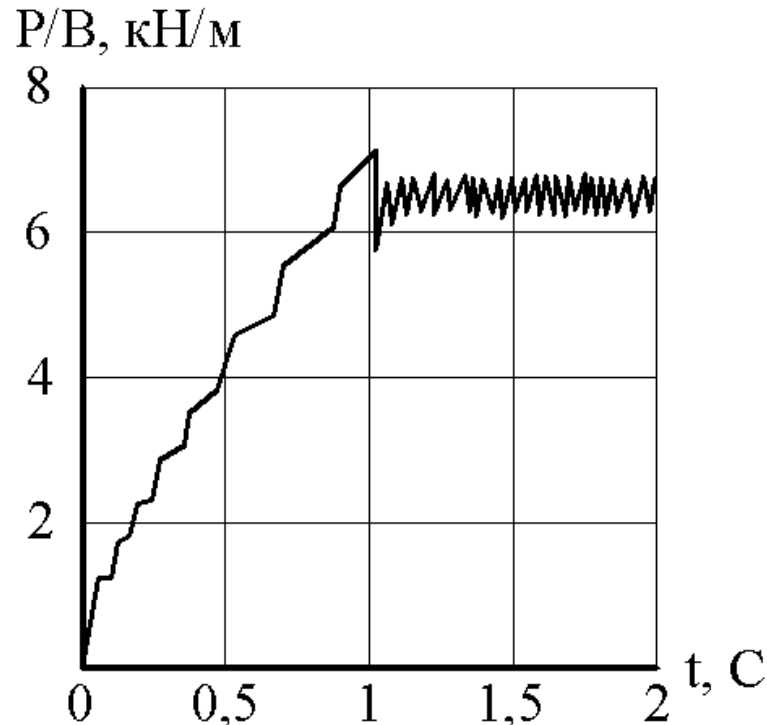


Рис. 3. Расчетные распределения, приведенные к единице ширины и силы прокатки

Наряду с распределением напряжений и деформаций представлена также информация о геометрии листа в результате прокатки.

Именно возникающая продольная кривизна в рассматриваемом случае является одним из основных показателей качества получаемой металлопродукции, так как ее значение определяет возможность реализации дальнейшей обработки давлением полосы (рис. 4).

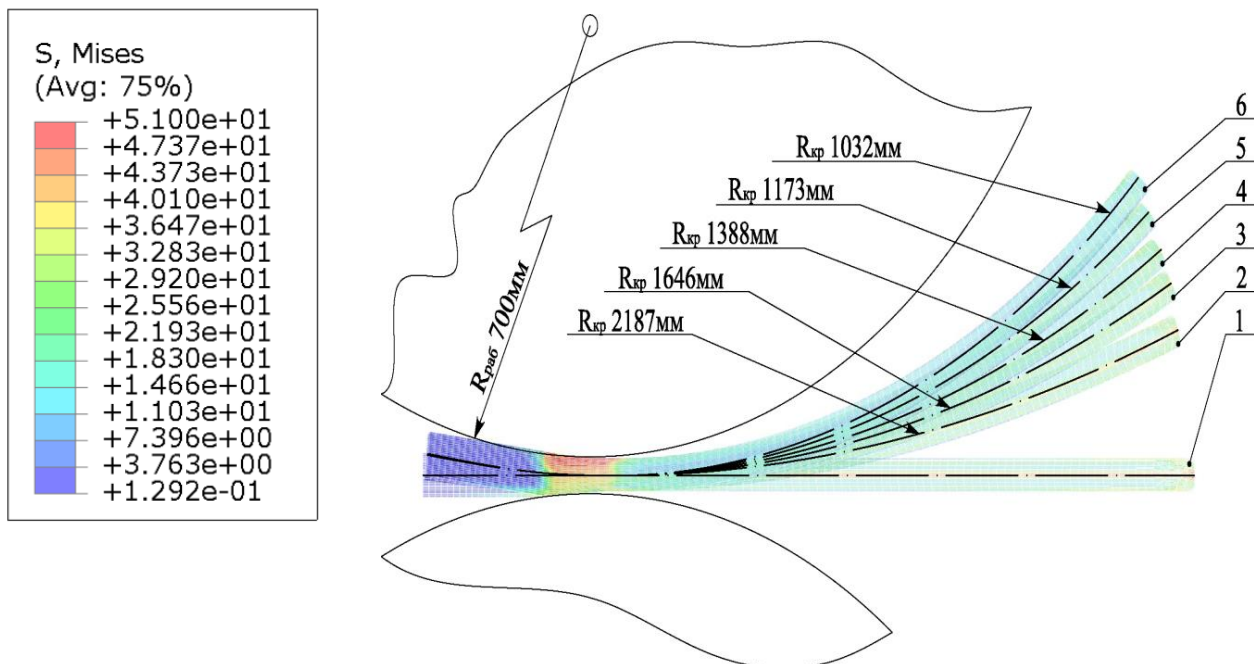


Рис. 4. Радиусы кривизны полосы на выходе и расчетные распределения эквивалентных напряжений по Мизесу: 1)  $T=900^{\circ}C$ ; 2) перепад температур  $910-890^{\circ}C$ ; 3) перепад температур  $920-880^{\circ}C$ ; 4) перепад температур  $930-870^{\circ}C$ ; 5) перепад температур  $940-860^{\circ}C$ ; 6) перепад температур  $950-850^{\circ}C$

Радиус кривизны в первом расчете  $\infty$ , во втором равен 2187 мм, в пятом – 1032 мм, т. е. кривизна листа увеличивается, что может вызвать аварийную ситуацию. Кроме этого, в этом случае возникает значительная перегрузка одного из валков, что может вызвать поломку.

### ВЫВОДЫ

Анализ представленных результатов свидетельствует о возможности прогнозирования не только основных показателей напряженно-деформированного состояния металла при его прокатке, но и таких показателей качества готовой металлопродукции, как результирующая продольная кривизна и остаточные напряжения. Таким образом, разработанная конечно-элементная модель может быть использована для оценки эффективности предложенной технологической настройки и режимов работы стана в каждом конкретном случае. Здесь следует отметить, что на практике проведение натуральных экспериментов или проведение какого-либо исследования занимает гораздо больше времени, чем расчет этого же процесса на обычном персональном компьютере, а количество информации, получаемое в результате расчета с использованием МКЭ, значительно превышает количество информации, полученной экспериментально. Представленная модель не ставит целью заменить натурные эксперименты, а лишь предоставляет возможность значительно уменьшить их количество.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Теоретичні основи обробки металів тиском : монографія : у 2 т. / Б. М. Глюкович, А. П. Огурцов, М. С. Нехаєв, С. В. Єршов. – Дніпропетровськ : РВА «Дніпро-ВАЛ», 2002. – Т. 2. – 485 с.*
2. *Belytschko T. Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures / T. Belytschko, W. K. Lin, B. Moran. – 2001. – 668 p.*
3. *Полухин П. И. Технология обработки металлов давлением / П. И. Полухин, А. Хензель. – М : Металлургия, 1988. – 204 с.*