

УДК 621.771.01

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ ОДНОСЛОЙНЫХ И ТРЕХСЛОЙНЫХ ПОЛОС МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

© 2011 г.

*И.А. Голубкова*

Институт машиноведения УрО РАН, Екатеринбург

irincha@imach.uran.ru

*Поступила в редакцию 15.06.2011*

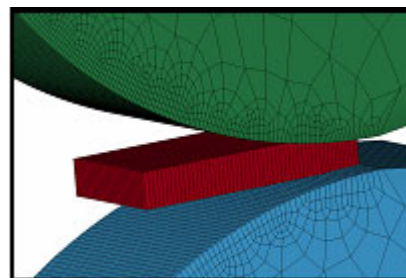
Работа посвящена трехмерному конечно-элементному моделированию процесса холодной прокатки однослойных и трехслойных композиций. Исследовались особенности напряженно-деформированного состояния, прогнозирование разрушения металла при прокатке в зависимости от технологических факторов и свойств деформируемого металла. Определены поля напряжений и деформаций в прокатываемых заготовках, а также характер деформации на границе разнородных материалов. Проведен анализ данных, полученных в результате моделирования, с результатами эксперимента.

*Ключевые слова:* холодная прокатка, конечно-элементное моделирование, напряженно-деформированное состояние, разрушение.

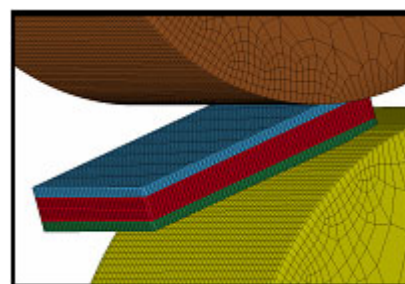
Современные теоретические исследования процессов обработки металлов давлением (ОМД) в значительной степени базируются на численных методах анализа, наиболее эффективным из которых является метод конечных элементов [1]. Данный метод реализован в программном комплексе LS-DYNA, все расчеты в данной работе были проведены в этом пакете.

Первоначально, была выполнена постановка конечно-элементной модели прокатки однослойной полосы (рис. 1а). Решались тестовые задачи с использованием данных [2], полученных в ходе экспериментального исследования контактных напряжений при холодной прокатке для алюминиевых образцов разной высоты на лабораторном стане в валках диаметром 196 мм при частоте вращения 11 об/мин. Задача исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) заготовки в процессе прокатки является контактной, упругопластической, нелинейной, требующей учета больших перемещений и деформаций. Выполнены постановка и решение задач [3]. Проведено сравнение экспериментальных эпюр нормальных контактных напряжений и эпюр, полученных при моделировании. Анализ эпюр показал, что величина и закономерности распределения нормальных контактных напряжений по контактной поверхности связаны с параметрами очага, определяющими характер неравномерности деформации. Сопоставление опытных эпюр и эпюр, полученных при решении тестовых задач, показало, что они качественно подобны, а среднее отклонение не превышает 15%. Это позволяет го-

ворить об адекватности осуществленного моделирования и применимости для более сложных случаев.



а)



б)

Рис. 1

Далее рассматривали модели прокатки однослойных образцов из меди М1, сталей 20 и 12Х18Н10Т, а также трехслойных композиций в сочетании слоев «12Х18Н10Т+Ст20+12Х18Н10Т» и «Медь+Ст20+Медь» (рис. 1б). Сочетание данных материалов выбрано не случайно. В настоящее время в Институте машиноведения ведутся работы по исследованию механических свойств

композитов после сварки взрывом [4, 5]. Одним из направлений этих исследований является создание феноменологической модели разрушения металлов, прочно соединенных взрывом, при интенсивной пластической деформации, в частности при прокатке. Для этого сначала необходимо выяснить НДС на границе материалов и сравнить с поведением материалов при однослойном деформировании. Расчет по конечно-элементной модели позволил определить показатели напряженного состояния – отношение среднего нормального напряжения к интенсивности касательных напряжений  $k$ , коэффициент Лодэ  $\mu_\sigma$  и показатель деформированного состояния – накопленную степень деформации сдвига  $\Lambda$  [6].

Показатели  $k$  и  $\mu_\sigma$  рассчитываются по следующим формулам:

$$k = \frac{\sigma_{cp}}{T}, \quad (1)$$

$$\mu_\sigma = 2 \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} - 1, \quad (2)$$

$$T = \frac{1}{\sqrt{6}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}, \quad (3)$$

где  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – главные нормальные напряжения;  $\sigma_{cp} = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$  – среднее нормальное напряжение (гидростатическое давление);  $T$  – интенсивность касательных напряжений.

Расчетные данные получены на боковой поверхности полосы, на середине поверхности контакта и на границе разнородных материалов при различных условиях деформирования (диаметр валков, степень обжатия, материал) в процессе прохождения полосы через очаг деформации. Установлено, что в пластической области свойства материалов слоев мало влияют на инвариантные характеристики НДС. В отличие от пластической области, в упругой области, имеющей место после выхода полосы из очага деформации, соотношение механических свойств материалов слоев в наибольшей мере определяет уровень остаточных напряжений.

В соответствии с феноменологической теорией разрушения [7, 8] деформируемость металла при холодной пластической деформации характеризуется зависимостью пластичности от показателей напряженного состояния  $k$  и  $\mu_\sigma$ . Основным концептуальным и расчетным параметром является поврежденность  $\omega$ . Расчет поврежденности выполнили для участка, находящегося на

боковой внеконтактной поверхности на продольной оси симметрии, где наиболее вероятно разрушение металла. Так как при этом деформация не знакопеременная, то поврежденность может быть рассчитана с использованием линейной модели по формуле:

$$\omega = \int_0^\Lambda \frac{d\Lambda}{\Lambda_p(k, \mu_\sigma)}, \quad (4)$$

где  $\Lambda_p$  – мера пластичности (пластичность) металла. Расчет по конечно-элементной модели позволил определить показатели  $k$  и  $\mu_\sigma$  и степень деформации сдвига  $\Lambda$ , на основании которых было рассчитано накопление поврежденности в очаге деформации.

В результате моделирования были определены поля напряжений и деформаций в прокатываемых заготовках, а также оценены параметры на границе разнородных материалов при прокатке. Установлено, что при решении задачи расчетные величины хорошо коррелируются с практически результатами. Характер деформации полос, формоизменения металла практически полностью соответствуют результатам реального физического эксперимента.

*Работа выполняется при частичной финансовой поддержке по Программе Президиума РАН №22 и РФФИ (грант №09-08-01091).*

#### Список литературы

1. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов: Пер. с англ. М.: Мир, 1979. 480 с.
2. Тарновский И.Я., Леванов А.Н., Поксеваткин М.И. Контактные напряжения при пластической деформации. М.: Металлургия, 1966. 280 с.
3. Смирнов С.В., Голубкова И.А. // Заготовительные производства в машиностроении. 2010. №5. С. 27–30.
4. Гладковский С.В. и др. // Заготовительные производства в машиностроении. 2010. №4. С. 41–45.
5. Гладковский С.В. и др. // Металловедение и термическая обработка металлов. 2009. №9 (651). С. 34–39.
6. Смирнов С.В., Швейкин В.П. Пластичность и деформируемость углеродистой стали. Екатеринбург: УрО РАН, 2008. 256 с.
7. Богатов А.А., Мижирецкий О.И., Смирнов С.В. Ресурс пластичности металла при обработке давлением. М.: Металлургия, 1984. 144 с.
8. Колмогоров В.Л. Напряжения, деформации, разрушение. М.: Металлургия, 1970. 252 с.

**SIMULATION OF SINGLE-LAYER AND THREE-LAYER COLD ROLLING  
BY FINITE-ELEMENT METHOD***I.A. Golubkova*

3D finite-element modelling of cold rolling of single-layer and three-layer strips is described. The features of stress-strained state, relationship between the deformation ratio, mechanical properties and fracture are discussed. The stress and strain fields are obtained in the strips and on the boundary of inhomogeneous materials. The experimental and modelling results are compared.

*Keywords:* cold rolling, finite-element modelling, stress-strained state, failure.