

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ВТОРИЧНОЙ ПРОКАТКЕ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЛИСТОВЫХ КОМПОЗИЦИЙ

Федоринов В.А., Сатонин А.В., Кулик Н.А. (ДГМА, г. Краматорск)

*На основе метода нижней оценки и метода конечных элементов разработаны математические модели напряженно-деформированного состояния, а также основных показателей качества готовой металлопродукции при реализации процесса вторичной прокатки относительно толстых биметаллических листов и полос.*

В настоящее время одними из основных методов теоретического анализа процесса вторичной горячей прокатки относительно толстых полиметаллических листовых композиций являются методы верхней [1] и нижней [2] оценки, а также метод конечных элементов [3]. Данные методы в полной мере обеспечивают возможность получения локальных и интегральных оценок энергосиловых и деформационных параметров, а также позволяют прогнозировать такие показатели качества, как вероятность появления дефектов сплошности и продольную кривизну готового металлопроката.

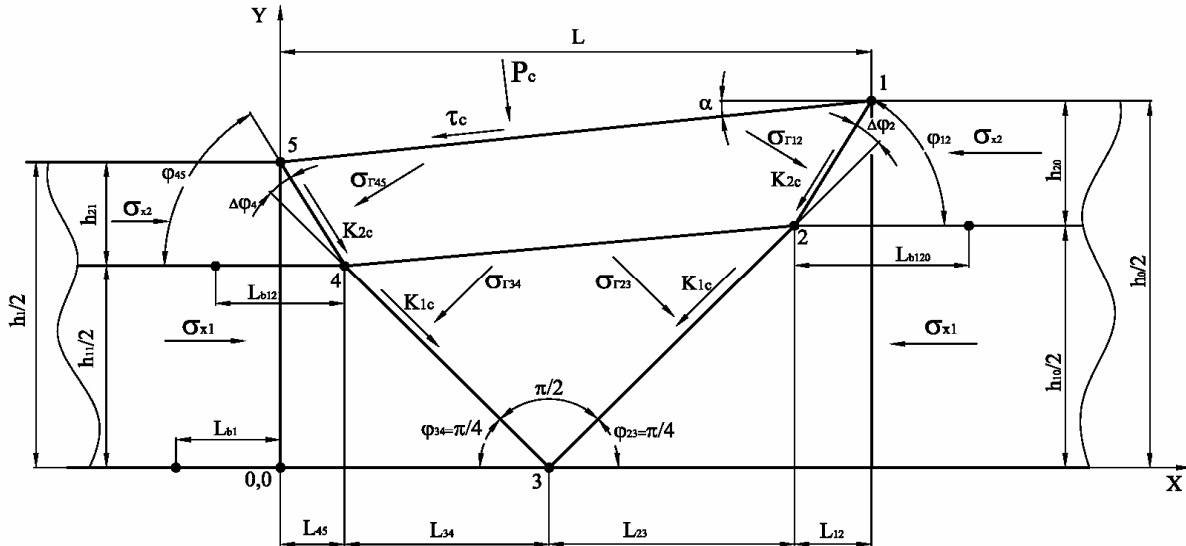
В соответствии с изложенным выше на основе метода нижней оценки была разработана математическая модель процесса вторичной прокатки относительно толстых трехслойных или четырехслойных симметричных по толщине биметаллических листов и полос, заключающаяся в численном построении и последующем количественном анализе полей характеристик в физической плоскости, соответствующих условиям статического равновесия. Используемые в этом случае расчетные схемы полей характеристик в физической плоскости  $XU$ , рассматриваемых применительно только к верхней половине очага деформации и отвечающих основным положениям метода полей линий скольжения, представлены на рисунке 1.

В рамках данной математической модели величину гидростатического напряжения  $\sigma_{r23}$  определяли как:

$$\sigma_{r23} = [K_{1c} h_{10}/2 + K_{c2} h_{20}/\text{tg}(\pi/4 + \Delta\varphi_2) - 2K_{2c} \Delta\varphi_2 h_{20}]/(h_0/2), \quad (1)$$

где  $K_{1c}$ ,  $K_{2c}$  - среднеинтегральные по длине очага деформации значения сопротивления сдвигу материалов внутренней и наружной составляющих прокатываемой трехслойной биметаллической листовой композиции;  $\varphi_{12} = \varphi_{23} = \pi/2$  - углы подхода соответствующих характеристик к го-

ризонтальним плоскостям;  $\Delta\varphi_2 = \varphi_{12} - \varphi_{23}$  - угол поворота характеристики 123 в особой точке 2, принадлежащей плоскости сопряжения различных составляющих, а основные геометрические параметры иллюстрированы рисунком 1.



**Рисунок 1** – Расчетная схема поля характеристик в физической плоскости применительно к процессу вторичной прокатки относительно толстых трехслойных и четырехслойных симметричных по толщине биметаллических листов

По отношению к нормальным осевым напряжениям  $\sigma_{y2}$ , действующих в особой точке 2 рассматриваемого поля характеристик в физической плоскости (см. рис. 1), на основе соотношений Мора [4] можно записать:

$$\sigma_{y2} = \sigma_{r12} + K_{2c} \sin 2\varphi_{12} = \sigma_{r23} + K_{1c} \sin 2\varphi_{23}, \quad (2)$$

или в окончательном виде:

$$\sigma_{y2} = \sigma_{r12} + K_{2c} \sin 2(\pi/4 + \Delta\varphi_2) = \sigma_{r23} + K_{1c} \sin 2 \cdot \pi/4 = \sigma_{r23} + K_{1c}. \quad (3)$$

С другой стороны гидростатические напряжения  $\sigma_{r12}$  и  $\sigma_{r23}$ , действующие в рамках соответствующих характеристик, связаны между собой функционально соотношением Генки [4]:

$$\sigma_{r12} = \sigma_{r23} + 2K_{2c}\Delta\varphi_2. \quad (4)$$

И, наконец, рассмотрев условие статического равновесия задней внешней зоны при проектировании всех сил на ось X (см. рис. 1), получим:

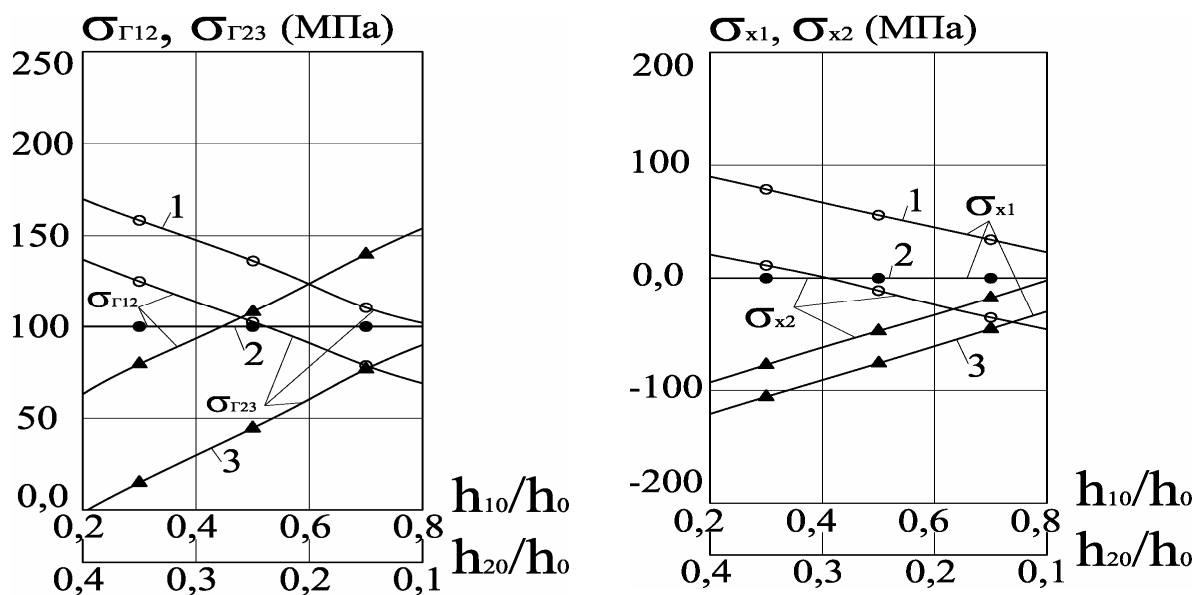
$$\Sigma F_{x123} = \sigma_{r12}h_{20} - K_{2c}L_{12} + \sigma_{r23}h_{10}/2 - K_{1c}L_{23} = 0. \quad (5)$$

В результате подстановки выражения (3) уравнение (2) после соответствующих математических преобразований сводится к виду:

$$K_{2c} [2\Delta\varphi_2 + \sin 2(\pi/4 + 2\Delta\varphi_2)] - K_{1c} = 0, \quad (6)$$

где непосредственное определение искомого значения  $\Delta\varphi_2$  в зависимости от известных значений  $K_{1c}$  и  $K_{2c}$  производили итерационно на основе метода целенаправленного перебора вариантов.

Далее с учетом известных значений  $\Delta\varphi_2$  и  $\sigma_{\Gamma 23}$  согласно (3) были определены гидростатическое напряжение  $\sigma_{\Gamma 12}$ , а вместе с этим и все основные показатели напряженного состояния металла при реализации рассматриваемой технологической схемы процесса вторичной прокатки (рис. 2).



**Рисунок 2** – Расчетные распределения основных компонент напряженно-деформированного состояния в зависимости от относительных толщин  $h_{01}/h_0$ ,  $h_{02}/h_0$  и среднеинтегральных значений сопротивления сдвигу  $K_{1c}$ ,  $K_{2c}$  материалов внутренней и наружных составляющих прокатываемой трехслойной биметаллической листовой композиции  $h_0 = 100\text{мм}$ ,  $h_1 = 80\text{мм}$ , 1 (—○—) –  $K_{1c} = 50\text{МПа}$ ,  $K_{2c} = 150\text{МПа}$ , 2 (—●—) –  $K_{1c} = K_{2c} = 100\text{МПа}$ , 3 (—▲—) –  $K_{1c} = 150\text{МПа}$ ,  $K_{2c} = 50\text{МПа}$ .

Анализируя полученные расчетные распределения следует отметить, что согласно условию прочности отдельных составляющих необходимо учесть наличие нормальных осевых напряжений растяжения  $\sigma_{x1}$  при  $K_{c1} > K_{c2}$  и  $\sigma_{x2}$  при  $K_{c1} < K_{c2}$  (см. рис. 2). С уменьшением геометрического соотношения  $h_{10}/h_0$  в первом случае ( $K_{c1} > K_{c2}$ ) имеет место весьма существенное увеличение нормальных осевых напряжений растяжения  $\sigma_{x1}$  по абсолютной величине, что при определенных условиях может при-

вести к разрушению внутренней составляющей непосредственно в очаге деформации. Аналогичная картина имеет место по отношению к наружной составляющей в случае  $K_{c1} < K_{c2}$  и при уменьшении относительного значения ее толщины  $h_{20}/h_0$ . Отмеченное свидетельствует о необходимости сопоставительного анализа расчетных  $\sigma_{x1(2)}$  и предельно допустимых  $[\sigma_{p1(2)}]$  напряжений.

В качестве конечно-элементного метода математического моделирования процесса вторичной прокатки полиметаллических композиций был использован метод конечных элементов при его программной интерпретации в пакете Abaqus .

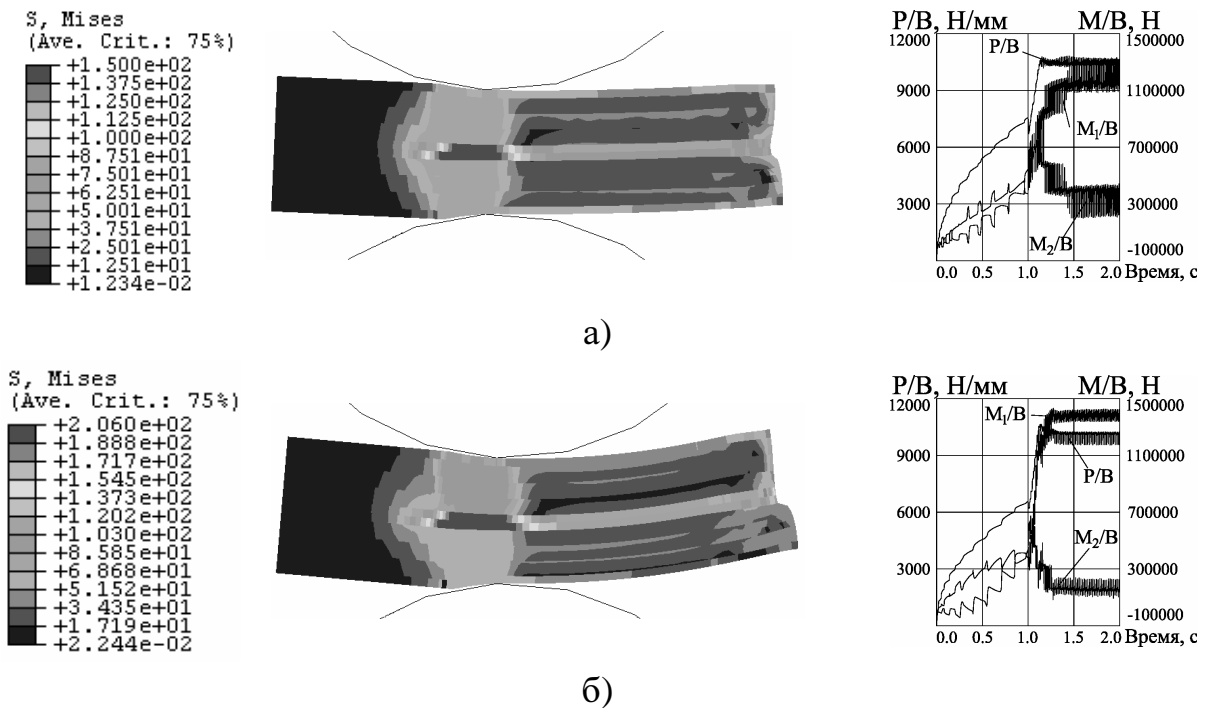
Постановка и решение задачи моделирования разбивались на два этапа. Первым этапом в данном случае является зажатие листа рабочими валками прокатного стана. Следующий этап заключается во вращении рабочих валков и реализации непосредственно процесса прокатки. При анализе рабочие валки моделировались как абсолютно жесткие поверхности, лист моделировался твердотельными четырехузловыми элементами с плоской деформацией и редуцированной схемой интегрирования. 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 полученной биметаллической композиции, а также вероятность разрушения композиции непосредственно при реализации процесса прокатки.

Однако, даже при реализации процесса прокатки четырехслойных симметричных пакетов возникает несимметричность механических свойств по толщине пакета, связанная с неравномерностью нагрева.

Актуальной задачей является оценка напряженно-деформированного состояния и основных показателей качества готовой металлопродукции при реализации процесса прокатки четырехслойных симметричных биметаллических пакетов с учетом возможной несимметричности механических свойств.

На рисунке 3 представлены расчетные распределения напряженно-деформированного состояния и энергосиловых параметров при горячей прокатке композиции 08X13–12XM, с разностью механических свойств верхней и нижней составляющих 10МПа (рис.3 а) и 30МПа (рис.3 б).

В качестве локальных характеристик представлены распределения эквивалентных напряжений, а также информация о форме переднего конца. В качестве интегральных характеристик представлены распределения приведенных к единице ширины значений силы и момента прокатки. В отличие от метода нижней оценки, метод конечных элементов позволяет прогнозировать продольную кривизну готового металлопроката.



**Рисунок 3** – Расчетные распределения локальных и интегральных характеристик напряженно-деформированного состояния металла при горячей прокатке биметаллических листов 08Х13 –12ХМ

Таким образом, на основе метода нижней оценки и метода конечных элементов разработаны численные математические модели напряженно-деформированного состояния металла при вторичной прокатке относительно толстых биметаллических листов и полос. Выявлен диапазон условий реализации данного процесса, связанный с повышенной вероятностью образования дефектов сплошности и формы готового металлопроката.

#### Литература

1. Сатонин А.В. Математическое моделирование кинематических и энергосиловых параметров процесса плакирования относительно толстых листов и полос // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2000. - №3. – С. 40-42.
2. Прокатка толстых листов / П.И. Полухин, В.М. Клименко, В.П. Полухин и др. - М.: Металлургия. - 1984. - 288с.
3. Liu G.R., Quek S.S. The Finite Element Method: A Practical Course. – 2003.- 348 с.
4. Томленов А.Д. Теория пластического деформирования металлов. – М.: Металлургия, 1972. – 408 с.

© Федоринов В.А., Сатонин А.В., Кулик Н.А.2008