

УДК 621.771: 621.774.21

Добронос Ю. К.
Дмитриев С. А.
Воротникова Е. А.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ОБРАЗОВАНИЯ ВНУТРЕННИХ ДЕФЕКТОВ ПРИ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКЕ СВАРНЫХ ШВОВ

При анализе условий реализации целого ряда процессов обработки металлов давлением, в том числе и процессов горячей прокатки сварных швов, одними из важнейших являются вопросы оценки вероятности появления и дальнейшего развития различного рода внутренних дефектов, во многом предопределяющих качество готовой металлопродукции, а также коэффициент выхода годного [1].

Среди множества факторов, обуславливающих появление внутренних микро и макродефектов, следует указать на возможность первоначального наличия несплошностей, расположенных, преимущественно в осевой зоне заготовки. Отмеченное, в частности, является характерным при обработке давлением литых структур [2, 3].

Наряду с исследованием показателей напряженно-деформированного состояния при анализе условий реализации процесса горячей прокатки сварных швов на основе численной интерпретации метода верхней оценки были проведены исследования вероятности появления и дальнейшего развития различного рода внутренних дефектов. При этом основной отличительной особенностью, является наличие зоны потенциальной несплошности общей протяженностью l_{tr} , в пределах которой сопротивление разрыву деформируемого материала σ_p меньше аналогичного показателя для остального материала заготовки, что потребовало корректировки методики построения и расчёта полученных полей [4].

Целью работы является исследование закономерностей образования внутренних дефектов сварных соединений, прогнозирование их появления, а так же разработка рекомендаций по их устранению с использованием процесса горячей прокатки.

В основу математического моделирования образования внутренних дефектов при горячей прокатке сварных швов была положена численная интерпретация метода верхней оценки [5–8]. Расчётная схема представлена на рис. 1.

Геометрические координаты особых точек кинематически возможных полей в физической плоскости ZY (см. рис. 1, а) соответствуют:

$$z_1 = 0,0; \quad y_1 = h_{xi} / 2; \quad z_2 = b_{xi1}; \quad y_2 = h_{xi} / 2; \quad y_3 = L_{tri} / 2; \quad (1)$$

$$\alpha_{xi1} = \arctg[(y_2 - y_3) / (z_2 - z_3)] = \arctg[(y_1 - y_3) / (z_3 - z_1)]. \quad (2)$$

Откуда, следуя принципу ортогональности характеристик в физической плоскости ZY и плоскости годографа скоростей $V_z V_y$, геометрические координаты особых точек 4', 5 и 7 (см. рис. 1, б) могут быть определены как:

$$Z_{V4'} = 0,0; \quad Y_{V4'} = V_x;$$

$$Z_{V5} = Y_{V4'} / \operatorname{tg} \alpha_{xi1}; \quad Y_{V5} = 0,0; \quad Z_{V7} = -Y_{V4'} / \operatorname{tg} \alpha_{xi1}; \quad Y_{V7} = 0,0, \quad (3)$$

где V_x – вертикальная составляющая скорости перемещения деформирующего инструмента, задаваемая количественно в виде масштаба построения кинематически возможного поля характеристик в плоскости годографа скоростей.

С учетом вышеизложенного, построение кинематически возможных полей характеристик было сведено к определению геометрической координаты y_3 , соответствующей минимуму суммарной мощности сдвига $N_{\Sigma i}$ для данного поперечного сечения.

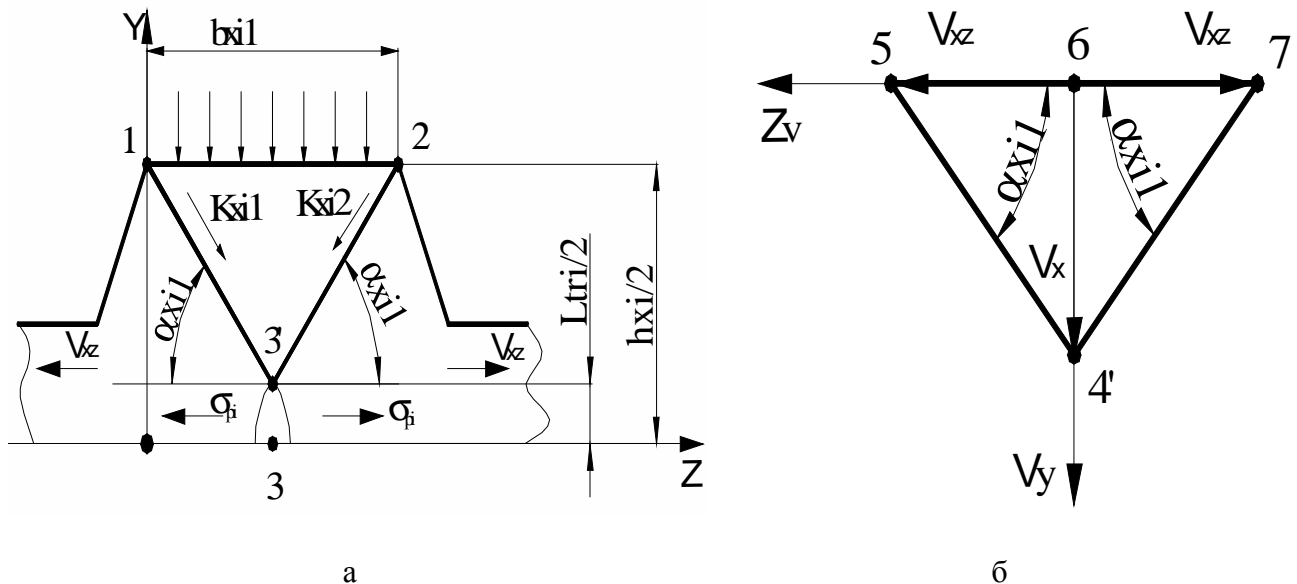


Рис. 1. Расчетные схемы кинематически возможных полей характеристик в физической плоскости (а) и плоскости годографа скоростей (б) применительно к прогнозированию возникновения и дальнейшего развития различного рода несплошностей в осевой зоне при горячей прокатке сварных швов

Исходя из полученных геометрических координат особых точек полей характеристик в физической плоскости и плоскости годографа скоростей, количественная оценка суммарной мощности сдвига $N_{\Sigma i}$ может быть представлена в виде:

$$\begin{aligned}
 N_{\Sigma i} &= 2 [K_{xi1} l_{3'1} l_{4'5} + K_{xi2} l_{3'2} l_{4'7}] + S_{Pi} (V_{z5} + V_{z7}) y_{3'} = \\
 &= 2 \left[K_{xi1} \sqrt{(y_1 - y_{3'})^2 + (z_3' - z_1)^2} \sqrt{(V_{z5} - V_{z4'})^2 + (V_{y4'} - V_{y5})^2} + \right. \\
 &\left. + K_{xi2} \sqrt{(y_2 - y_{3'})^2 + (z_2 - z_3')^2} \sqrt{(V_{z4'} - V_{z7})^2 + (V_{y4'} - V_{y7})^2} \right] + S_{Pi} (V_{z5} + V_{z7}) y_{3'},
 \end{aligned} \quad (4)$$

где $S_{Pi} (V_{z5} + V_{z7}) y_{3'}$ – приведенная к единице ширины мощность потенциального разрушения в осевой зоне;

l_{ij} – протяженности соответствующих отрезков, полученных при построении кинематически возможных полей характеристик в физической плоскости и плоскости годографа скоростей (см. рис. 1);

K_{xi1}, K_{xi2} – текущие по длине очага деформации значения сопротивления сдвигу деформируемого металла на соответствующих границах зоны пластического формоизменения наружного и внутреннего сварных швов.

Непосредственное определение геометрической координаты z_3' осуществляли итерационно на основе метода целенаправленного перебора вариантов, аналитическая форма записи которого имеет следующий вид:

$$z_{3'(t+1)} = z_{3't} + A_z \operatorname{sign}\{N_{\Sigma i(t-1)} - N_{\Sigma it}\}, \quad (5)$$

где t – порядковый номер очередного цикла итерационной процедуры;

A_z – шаг изменения геометрической координаты z_3' ;

$\operatorname{sign}\{N_{\Sigma i(t-1)} - N_{\Sigma it}\}$ – градиентная функция знака.

Итерационная процедура по определению геометрической координаты z_1 была дополнена внешним контуром численного определения протяженности зоны потенциальной несплошности, также соответствующая минимуму приведенного значения суммарной мощности сдвига:

$$L_{tr}(k+1) = L_{tr}(k) + A_{Ltr} \text{sign}\{N_{\Sigma i}(k+1) - N_{\Sigma i}(k)\}, \quad (6)$$

где k – порядковый номер очередного цикла внешней итерационной процедуры решения;

A_{Ltr} – шаг приращения протяженности зоны потенциального разрыва.

Представленные на рис. 2 расчетные распределения приведенной суммарной мощности сдвига в зависимости от относительной протяженности зоны несплошности (а), а также в зависимости от относительной протяженности зоны несплошности и геометрической характеристики очага деформации b_{xi}/h_{xi} (б) при различных значениях предела прочности деформируемого материала σ_{pi} в зоне несплошности, были получены на основе результатов численной реализации разработанных математической модели и соответствующих ей программных средств.

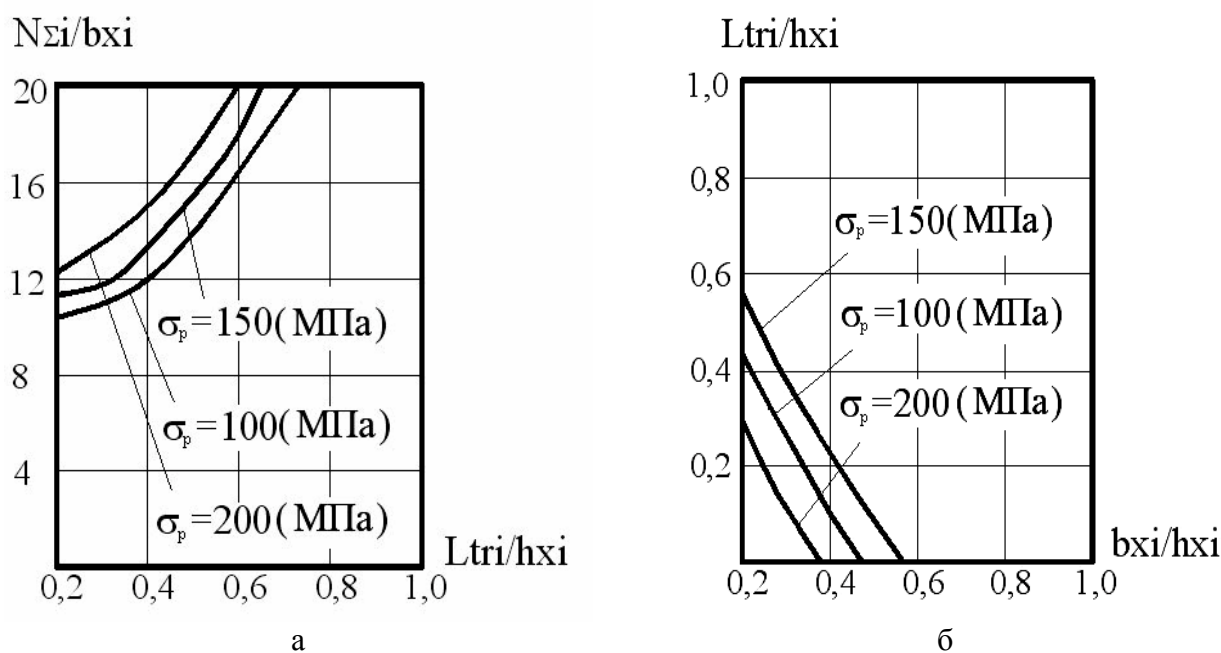


Рис. 2. Расчётные распределения суммарной мощности сдвига $N_{\Sigma i}$ в зависимости от относительной протяженности зоны несплошности (а), а также в зависимости от относительной протяженности зоны несплошности и геометрической характеристики очага деформации b_{xi}/h_{xi} (б) при различных значениях предела прочности деформируемого материала σ_{pi}

Из анализа полученных распределений можно сделать вывод о монотонности функциональной зависимости $N_{\Sigma i} = f(L_{tri}/h_{xi})$, характеризующейся явно выраженным минимумом в точке $L_{tri}/h_{xi} = 0,1 \div 0,2$ при высоких значениях предела прочности исследуемого материала σ_p . В тоже время, при низких значениях σ_p – минимум наблюдается в диапазоне значений относительной протяженности зоны несплошности $L_{tr}/h_{cp} = 0,3$ (см. рис. 2, а). Именно в этом промежутке значений вероятность образования и дальнейшего развития внутренних дефектов наиболее велика. Увеличение вероятности потенциальной несплошности

L_{tri}/h_{xi} (а) от геометрической характеристики очага деформации b_{xi}/h_{xi} (б) при различных значениях предела прочности материала σ_P в осевой зоне прокатываемого сварного шва образования дефектов имеет также место при уменьшении значений относительной геометрической характеристики очага деформации b_{xi}/h_{xi} (см. рис. 2, б). В случае же $b_{xi}/h_{xi} > 1,3...1,5$ появление дефектов маловероятно и, более того, возможным является даже залечивание ранее образовавшихся внутренних дефектов сплошности прокатываемого сварного шва.

ВЫВОДЫ

Разработанная математическая модель на основе метода верхней оценки позволяет в полной мере установить закономерность появления внутренних дефектов сварных соединений, а так же разработать практические рекомендации по их устранению.

В свете изложенного выше можно заключить, что рассмотренные теоретические решения в рамках данных исследований, основанных на использовании различных методов и подходов, могут составить основу математического обеспечения комплекса программных средств по автоматизированному расчёту напряжённо-деформированного состояния металла при локальной термомеханической обработке сварных соединений с использованием процесса горячей прокатки.

Данный комплекс был использован для анализа влияния и совершенствования технологических режимов работы и конструктивных параметров оборудования данного процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Технология, оборудование и методы расчета процесса локальной термомеханической обработки электросварных труб большого диаметра с использованием горячей прокатки* / В. Ф. Потанкин, А. В. Сатонин, Ю. К. Доброносков, С. В. Новоселов, С. Б. Вольченко, А. В. Послушняк // *Металлург.* – 2004 (Спецвыпуск). – С. 27–30.
2. *Сатонин А. В. Теоретическое исследование напряженно-деформированного состояния металла при локальной термомеханической обработке сварных швов* / А. В. Сатонин, Ю. К. Доброносков, В. В. Тимченко // *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії та машинобудуванні* : зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2007. – С. 428–433.
3. *Томленов А. Д. Теория пластического деформирования металлов* / А. Д. Томленов. – М. : *Металлургия*, 1972. – 408 с.
4. *Соколовский В. В. Теория пластичности* / В. В. Соколовский. – М. : *Высш. школа*, 1968. – 608 с.
5. *Качанов Л. Н. Основы теории пластичности* / Л. Н. Качанов. – М. : *Наука*, 1969. – 420 с.
6. *Бровман М. Я. Применение теории пластичности в прокатке* / М. Я. Бровман. – М. : *Металлургия*, 1991. – 265 с.
7. *Бровман М. Я. К расчету энергосиловых параметров процесса прокатки многослойных полиметаллических листов и полос* / М. Я. Бровман, А. В. Сатонин, Д. В. Чуков // *Известия вузов. Черная металлургия.* – 1991. – № 1. – С. 39–41.
8. *Сатонин А. В. Математическое моделирование кинематических и энергосиловых параметров процесса плакирования относительно толстых листов и полос* / А. В. Сатонин // *Известия вузов. Черная металлургия.* – 2000. – № 3. – С. 40–42.

Доброносков Ю. К. – канд. техн. наук, доц. кафедры АММ ДГМА;

Дмитриев С. А. – аспирант ДГМА;

Воротникова Е. А. – студент ДГМА.

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

E-mail: amm@dgma.donetsk.ua