

УДК 621.771.01

Шпак В. И.
Кулик Т. А.
Кондратов Д. В.
Пластун Д. О.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТИ ПРОКАТКИ НА ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ ОЧАГА ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ТЕПЛОЙ ПРОКАТКЕ ОТНОСИТЕЛЬНО ТОНКИХ ПОЛОС

Упрочняющие и разупрочняющие процессы при обработке давлением протекают во времени с определенными скоростями, обусловленными условиями деформации и природой деформируемого металла. В зависимости от того, какой из процессов будет преобладающим, результаты деформации будут различны. Случай, когда рекристаллизация отсутствует, но процесс возврата успевает произойти, получил название теплой деформации. Пластические свойства металла после теплой деформации выше, чем у металла, деформированного при отсутствии возврата, а прочностные свойства несколько ниже [1].

Основным технологическим предназначением процессов теплового деформирования как правило является производство изделий из металлов и сплавов, обработка давлением которых в холодном состоянии, вследствие высокого сопротивления деформации и низкой пластичности, является невозможной или нецелесообразной. Однако, в последнее время все более широкое распространение получают процессы теплой прокатки углеродистых сталей [2], хотя при 300 °С пластичность их снижается (так называемый эффект синеломкости). Вот почему при выборе режима теплой деформации сталей, склонных к синеломкости, следует учитывать, что температура деформации не должна совпадать с температурой снижения пластичности.

Наиболее существенной технологической особенностью процесса теплой прокатки является значительная неоднородность текущих и результирующих показатели деформированного состояния, распределения температур, а вместе с ними и показателей уровней физико-механических свойств по толщине, причем на степень указанной неоднородности существенное влияние оказывает скорость прокатки [3].

Целью работы, поэтому, является разработка и апробация методики учета влияния скорости прокатки на распределение температуры по длине и высоте очага деформации при реализации процесса теплой прокатки относительно тонких полос.

Математическое моделирование процесса теплой прокатки было выполнено на основе конечно-разностного решения температурного поля и соответствующего статического равновесия выделенных элементарных объемов, полученных путем разбиения всей зоны очага деформации по длине и высоте (рис. 1).

Температурное решение было осуществлено на основе методики работы [4]. С учетом принятых обозначений (см. рис. 1) граничная температура выделенного объема определяется как:

$$t_{xi2j} = t_{xi1j} - \frac{\delta_t}{1 + \delta_t} (t_{xi1j} - t_{bxi1}) (X_{tmi1j} + X_{tmi2j}) + Q_{Fij} \frac{2\Delta x}{V_{xi1} + V_{xi2}} \times \\ \times \left[1 - \frac{\delta_t}{1 + \delta_t} (Y_{tmi1j} + Y_{tmi2j}) \right] + \frac{2Q_{\dot{a}ij} \sqrt{2a_n \Delta x / (V_{xi1} + V_{xi2})}}{(1 + \delta_t) \lambda_n} (Z_{tmi1j} + Z_{tmi2j}), \quad (1)$$

где δ_t – термофизический критерий, характеризуемый количественно теплопроводностью λ , теплоемкостью c и плотностью ρ материалов; a_n – показатель температуропроводности; X_{tn} , Y_{tn} , Z_{tn} – характеристические функции составляющих температурного поля полосы, зависящие, соответственно, от начальной разности температур, тепловыделения от пластического формоизменения (источник Q_F) и от работы сил трения (источник Q_T).

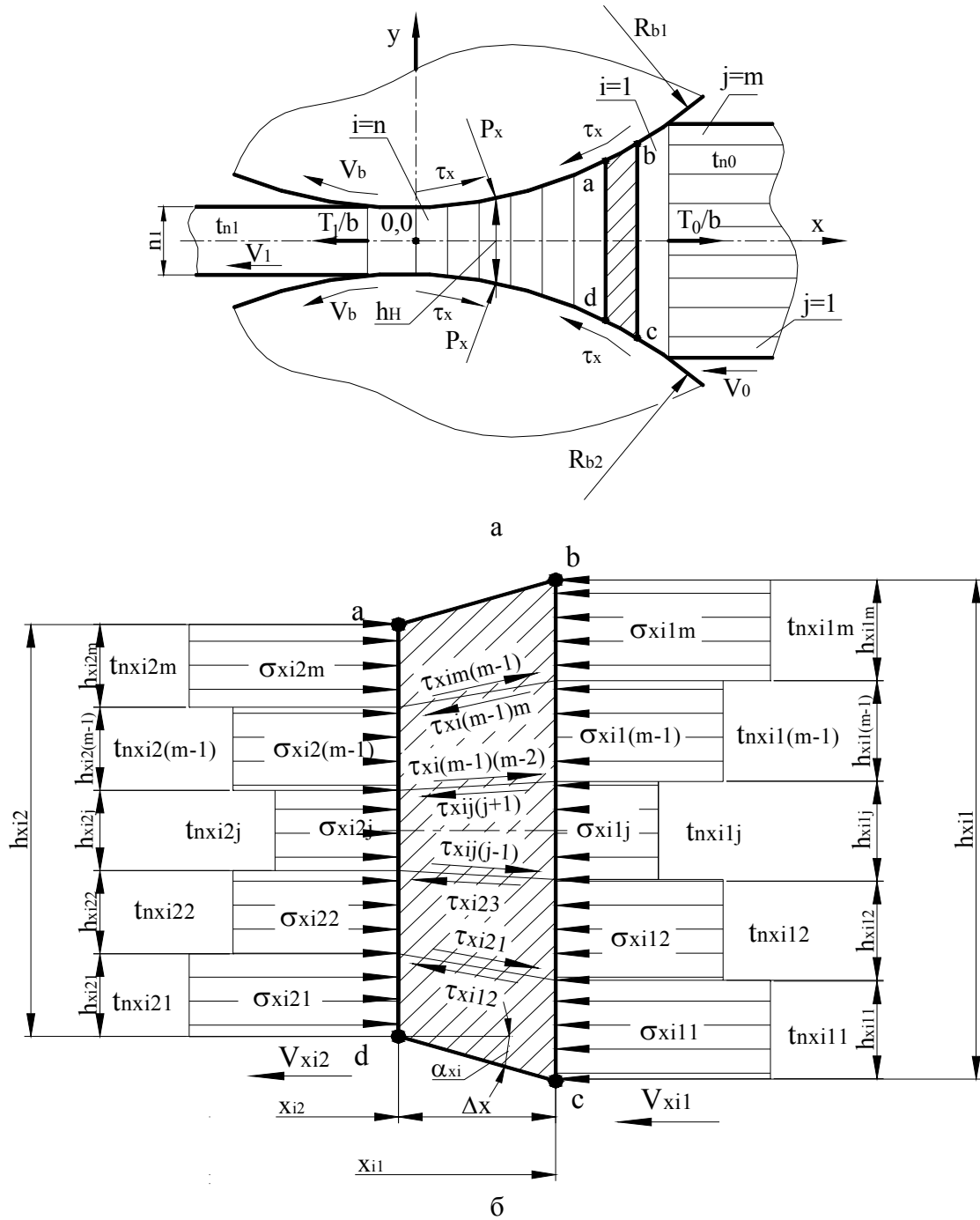


Рис. 1. Расчетные схемы очага деформации (а) и выделенного элементарного объема (б)

Количественные оценки источника тепловыделения от пластического формоизменения металла и от действий сил внешнего трения в рамках каждого элементарного объема, в свою очередь, могут быть определены как:

$$Q_{Fij} = \frac{0,25\eta_{\text{вых}} [(2K_{xi1j} + 2K_{xi2j}) - (\sigma_{xi1j} + \sigma_{xi2j})] \ln(h_{xi1j}/h_{xi2j}) (V_{xi1} + V_{xi2})}{c_n \rho_n \Delta x}; \quad (2)$$

$$Q_{\tau ji} = \frac{0,125 [(p_{xi1} + p_{xi2}) - (2K_{xi1j} + 2K_{xi2j}) + (\sigma_{xi1j} + \sigma_{xi2j})] h_{xi2j} \ln(h_{xi1j}/h_{xi2j}) (V_{xi1} + V_{xi2})}{\Delta x}, \quad (3)$$

где $\eta_{\text{вых}}$ – коэффициент преобразования работы формоизменения в тепловую энергию; $2K_{xi(2)j} = F(\epsilon, u, t)$ – показатели удвоенного сопротивления сдвигу граничных сечений i -го по длине и j -го по уровню выделенного элементарного объема (см. рис. 1).

Как следует из зависимостей (1)–(3) на температуру выделенного элементарного объема помимо напряженно-деформированных показателей очага деформации оказывает влияние также скорость прокатки. Причем скорость перемещения прокатываемой полосы участвует в представленных зависимостях как в явном виде (V_x), так и опосредованно в виде удвоенного значения сопротивления сдвигу, являющегося функцией степени, скорости и температуры деформации, поскольку скорость деформации в рамках данной модели можно определить как:

$$u_{xij} = \left\{ (\varepsilon_{xi2} - \varepsilon_{xi1}) V_{xi1} h_{1j} \left[1/h_{xi1j} + 1/h_{xi2j} \right] \right\} / 2\Delta x, \quad (4)$$

где $\varepsilon_{xij} = (h_{0j} - h_{xij}) / h_{0j}$ – текущее значение показателя относительного обжатия данной составляющей.

Анализ влияния скоростных режимов теплой прокатки относительно тонких полос был проведен на основе результатов численной реализации математической модели и соответствующих программных средств. При этом в качестве основного объекта исследования был рассмотрен процесс теплой прокатки относительно тонких полос их стали 50Г, склонной к синеломкости при 305 °С.

На рис. 2 и 3 представлены распределения температуры по высоте и длине очага деформации для различных скоростей прокатки.

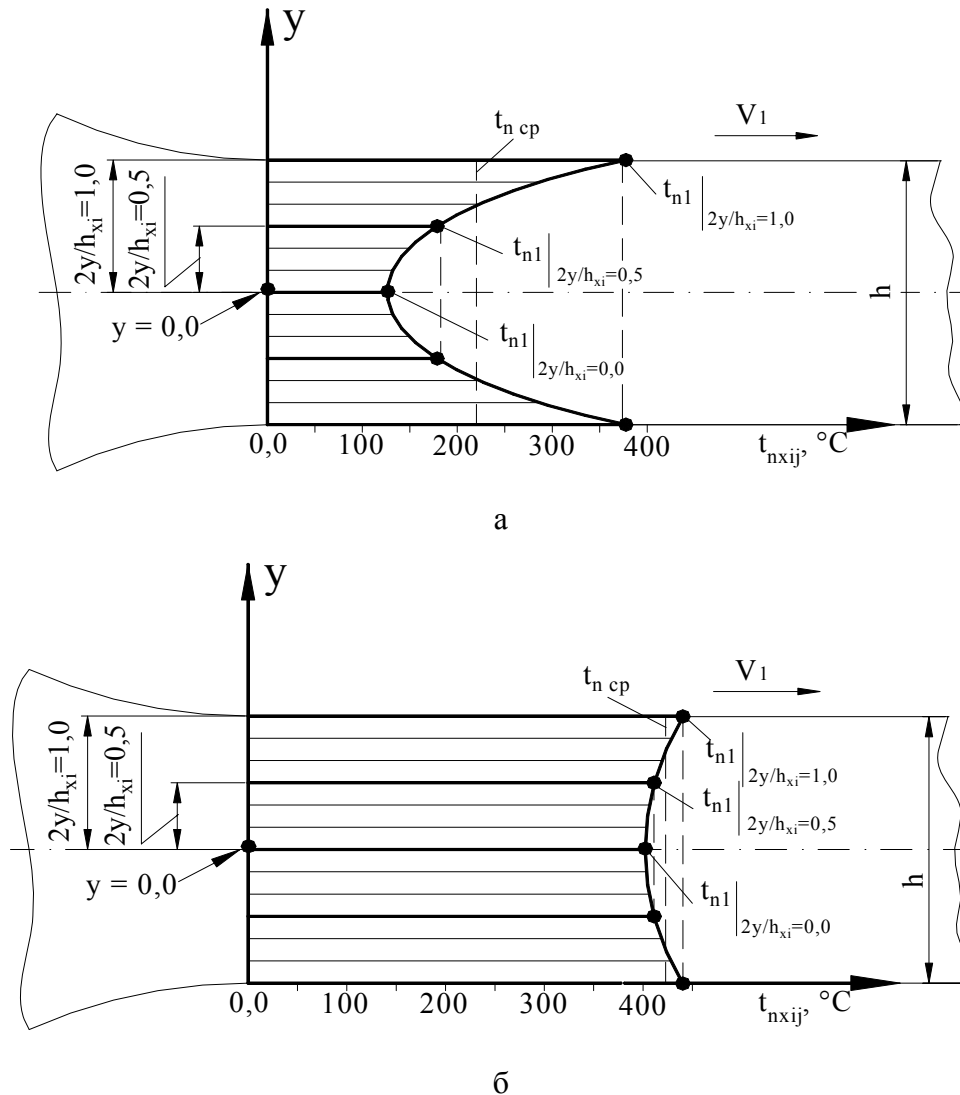


Рис. 2. Расчетные распределения результирующих температур для различных по уровню линий тока прокатываемых полос:

а – $V_1 = 10$ м/с; б – $V_1 = 0,1$ м/с

Из результатов анализа представленных расчетных распределений следует, что в самом общем случае условий реализации процессов теплой прокатки, распределения результирующих температур t_n по их толщине h не является однородным и характеризуется наличием минимума по оси, то есть при $2y/h_{xi} = 0,0$, и наличием максимума на контактной поверхности, то есть при $2y/h_{xi} = 1,0$. С увеличением скорости прокатки V степень указанной выше неоднородности возрастает, при этом температура контактной поверхности $t_{n1}|_{2y/h_{xi}=1,0}$ может превышать температуру по оси $t_{n1}|_{2y/h_{xi}=0,0}$ прокатываемой ленты на 200 °С и более.

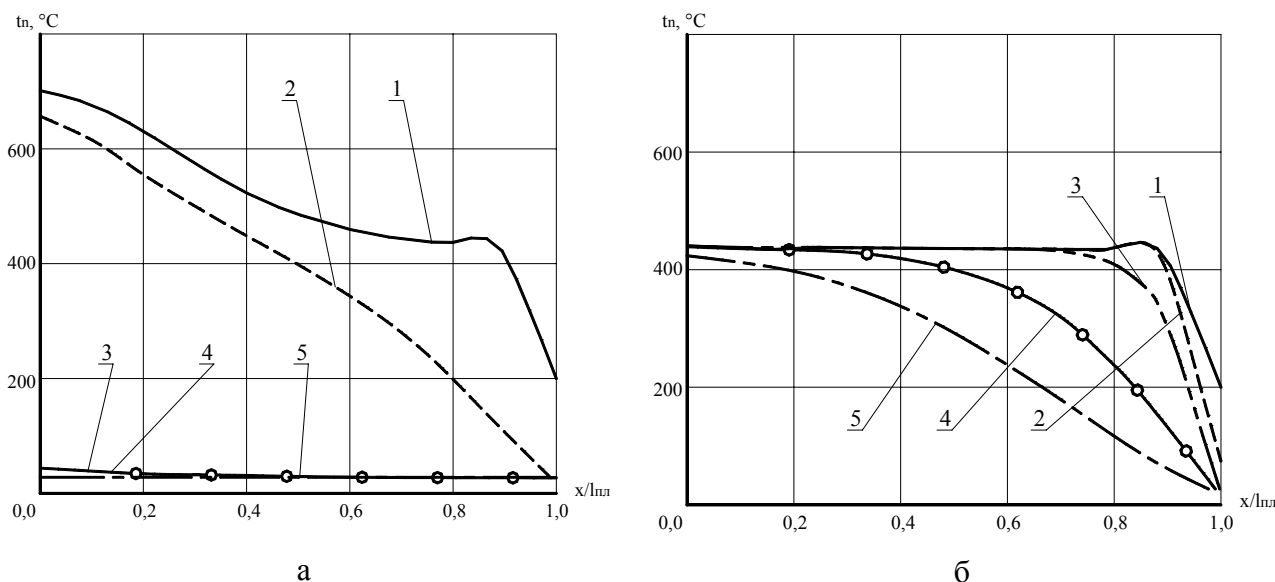


Рис. 3. Расчетные распределения текущих по длине очага деформации температур для различных по уровню линий тока прокатываемых полос:

а – $V_1 = 10$ м/с; б – $V_1 = 0,1$ м/с; 1 — ($2y/h_{xi} = 1$); 2 - - - ($2y/h_{xi} = 0,75$); 3 - · - ($2y/h_{xi} = 0,5$); 4 — ● — ($2y/h_{xi} = 0,25$); 5 — · · · ($2y/h_{xi} = 0,0$)

В целом, с увеличением скорости прокатки V имеет место снижение результирующих температур для всех линий тока, однако именно для линии тока по оси $t_{n1}|_{2y/h_{xi}=0,0}$ интенсивность данного снижения является максимальной. Отмеченное обусловлено влиянием временного фактора процессов теплообмена и температуропроводности. С уменьшением скорости процесса теплой прокатки разность температур $t_{n1}|_{2y/h_{xi}=1,0}$ и $t_{n1}|_{2y/h_{xi}=0,0}$ интенсивно снижается, и при скорости $V_1 = 0,1$ м/с не превышает 40 °С. Все это свидетельствует о наличии дополнительных ограничений по кинематическим параметрам условий реализации, вытекающим из условий прогрева металла осевой зоны прокатываемых полос до требуемых температур.

Для проверки адекватности разработанной математической модели на лабораторной базе кафедры «Автоматизированные металлургические машины и оборудование» ДГМА были проведены экспериментальные исследования температурного режима при реализации процесса листовой прокатки относительно тонких заготовок. Методика и оборудование данных исследований представлена в работе [5].

На рис. 4 представлены эмпирические распределения температур по толщине заготовки. При этом непосредственно процесс пластической деформации осуществляли без предварительного подогрева исходных заготовок ($t_{n0} \approx 20$ °С) и с предварительным подогревом в сушильном шкафу рабочих сегментов ($t_{b0} \approx 300$ °С).

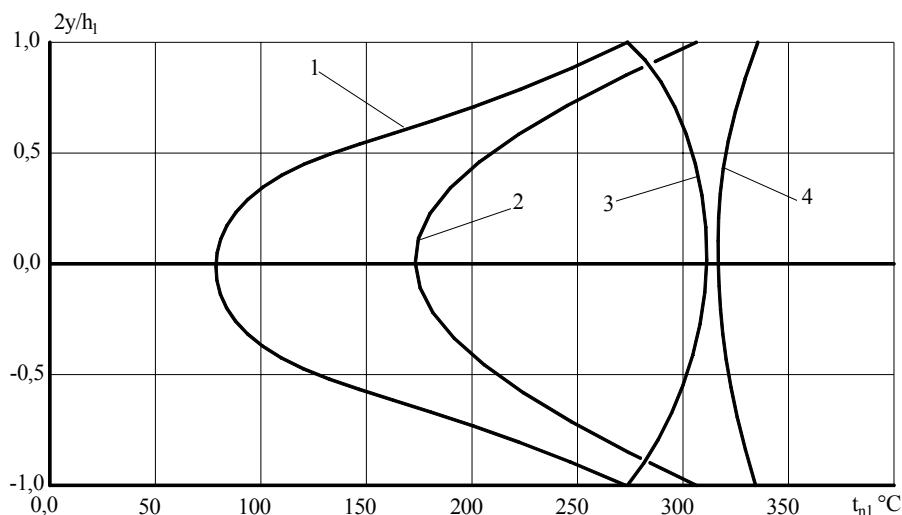


Рис. 4. Эмпирические распределения результирующих температур по толщине прокатанной заготовки для различных скоростей деформации:

1 – $V = 12$ м/с; 2 – $V = 7$ м/с; 3 – $V = 0,01$ м/с; 4 – $V = 0,1$ м/с

Касаясь результатов экспериментальных исследований распределений температур по толщине прокатанной заготовки, необходимо указать на их существенную неоднородность, отличающуюся и количественно, и качественно при различных скоростях прокатки. При этом и характер, и количественные показатели соответствуют аналогичным расчетным значениям.

ВЫВОДЫ

Представлена математическая модель взаимосвязи скорости прокатки, удвоенного сопротивления сдвигу и температуры металла при реализации процесса теплой прокатки относительно тонких полос. На основе результатов численной реализации разработанной модели показано влияние скорости прокатки на распределение температуры как по длине, так и по высоте очага деформации. При этом показано, что распределение температуры при различных скоростях прокатки отличается существенной количественной и качественной неоднородностью. Представленные результаты подтверждены экспериментальными данными.

ЛИТЕРАТУРА

1. Губенко С. И. Деформация металлических сплавов / С. И. Губенко, В. В. Парусов. – Днепропетровск : АРТ-ПРЕСС, 2006. – 316 с.
2. Макаров Ю. Д. Идентификация и статистические оценки энергосиловых параметров процесса прокатки полос из стали 08ю на стане 1700 ОАО «Северсталь» / Ю. Д. Макаров // Наука и Образование. Электронное научно-техническое издание. – 2008. – № 5.
3. Бельченко Г. И. Основы металлографии и пластической деформации стали / Г. И. Бельченко, С. И. Губенко. – К., Донецк : Вища школа, 1987. – 240 с.
4. Федоринов В. А. Численное математическое моделирование напряжений, деформаций и температурных режимов при теплой прокатке относительно тонких лент, листов и полос / В. А. Федоринов, Т. А. Кулик, А. А. Сатонин // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : тематик. зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2002. – С. 442–446.
5. Шпак В. И. Методика, оборудование и результаты экспериментального исследования температурных режимов процессов листовой прокатки. / В. И. Шпак, А. Н. Кулик, Т. А. Кулик // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском у металургії і машинобудуванні : тематич. зб. наук. пр. – Краматорськ, ДДМА. – 2008. – С. 299–302.

Шпак В. И. – канд. техн. наук ДГМА;
 Кулик Т. А. – канд. техн. наук ДГМА;
 Кодратов Д. В. – студент ДГМА;
 Пластун Д. О. – студент ДГМА.

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

E-mail: okmm@dgma.donetsk.ua