

УДК 621.771.01

Добронос Ю. К.
Смолякова В. В.
Настоящая С. С.
Бурдов И. С.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ ПРИ ИХ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКЕ*

Многообразие физических явлений, имеющих место при реализации различных технологических схем процессов пластического формоизменения металлов и сплавов, делает приоритетным использование экспериментальных подходов по определению сопротивления деформации конкретных металлов или сплавов применительно к конкретным условиям их пластического деформирования. Результаты соответствующих экспериментальных исследований в виде их графических или табличных интерпретации представлены в целом ряде работ [1, 2]. Вместе с тем, с точки зрения численного математического моделирования различных процессов обработки металлов давлением особый интерес представляют аналитические и алгоритмические описания локальных и результирующих характеристик сопротивления деформации, используемые в качестве граничных условий в рамках конкретного математического моделирования.

Целью данной работы является анализ существующих аналитических описаний изменения сопротивления деформации при горячей прокатке, а также сравнение экспериментальных и расчетных данных, полученных численными рекуррентными решениями, учитывающими реальный характер распределений степени, скорости и температуры по длине очага деформации.

Среди аналитических описаний изменения сопротивления деформации σ_s при горячей прокатке, знание которого необходимо для расчета всего комплекса энергосиловых параметров, в настоящее время наибольшее распространение получила методика Л. В. Андreyока [3], определяющая величину σ_s в зависимости от степени ε , скорости U и температуры t деформации как:

$$\sigma_s = \sigma_{s0} (10\varepsilon)^b U^a (t/1000)^c, \quad (1)$$

где σ_{s0} – опорное значение сопротивления деформации данного металла при $\varepsilon = 0,1$; $U = 10c^{-1}$; $t = 1000^\circ\text{C}$; a , b , c – постоянные для каждого отдельного металла или сплава коэффициенты, определяемые по результатам пластометрических испытаний и характеризующие степень влияния соответствующих термомеханических параметров процесса пластического формоизменения.

Количественные оценки указанных выше эмпирических коэффициентов для целого ряда материалов представлены в различных работах [3], кроме того, в работе [3] даны регрессионные описания, позволяющие определять данные коэффициенты непосредственно в зависимости от химического состава рассматриваемых марок стали. Определение же сопротивления деформации при горячей прокатке, то есть при наличии переменных по объему зоны пластического формоизменения значений ε и U , осуществляют на основе усредненного значения σ_{sc} при одновременном использовании среднеинтегральных по длине очага деформации L оценок показателей степени ε_c , скорости U_c и температуры t_c деформации [4]. При этом расчет среднеинтегральных оценок степени и скорости деформации с учетом исходной h_0 и конечной h_1 толщины прокатываемых лент, листов или полос, а также с учетом скорости прокатки v_1 производят на основе общеизвестных [4] зависимостей $\varepsilon_c = 2(h_0 - h_1)/h_0$; $U_c = v_1(h_0 - h_1)/(h_0L)$.

* Работа выполнена под руководством д-ра техн. наук, проф. Сатонина А. В.

Среди зависимостей, аналогичных уравнению (1) и также получивших широкое распространение, необходимо отметить решение, полученное автором работы [5] для процесса горячей прокатки:

$$\sigma_{SC} = \sigma_{S0} \varepsilon_c^{n_1} U_c^{n_2} \exp(-n_3 t_c), \quad (2)$$

где n_1, n_2, n_3 – постоянные для каждого отдельного металла или сплава коэффициенты, характеризующие по аналогии с коэффициентами a, b, c уравнения (1) степень влияния среднеинтегральных оценок соответствующих термомеханических параметров процесса горячей прокатки.

Продолжая анализ известных методов расчета, следует отметить, что определение сопротивления деформации на основе зависимостей (1), (2) и аналогичных им, т. е. определение σ_{SC} при помощи среднеинтегральных оценок основных показателей термомеханического состояния не позволяет в полной мере учесть процессы упрочнения – разупрочнения,

степень влияния которых существенно зависит от истории развития деформации во времени [1, 2]. Отсутствует в этом случае и возможность определения локальных характеристик σ_{Sx} , знание которых необходимо при разработке численных математических моделей, обеспечивающих корректный учет реального характера распределенной степени ε_x , скорости U_x и температуры t_x по длине очага деформации процесса горячей прокатки [6] (рис. 1).

Вместе с тем, исходя из зависимости (1), а также из того, что интенсивность междеформационного разупрочнения может быть учтена за счет соответствующей корректировки показателя степени деформации ε_j^* [7, 8], алгоритм математического моделирования текущего значения сопротивления деформации σ_{Sj} при наличии междеформационных пауз можно представить в виде численного рекуррентного решения следующего вида [7, 8]:

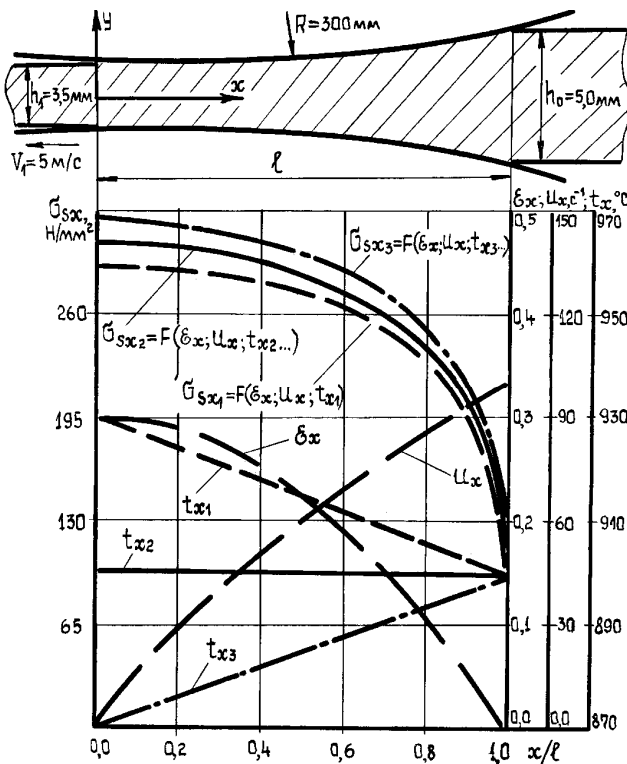


Рис. 1. Расчетные распределения степени ε_x , скорости u_x , температуры t_x и сопротивления σ_{Sx} деформации стали 30ХГСА, имеющие место по длине очага деформации процесса горячей прокатки

$$\sigma_{Sj} = \sigma_{S0} \left\{ 10[\varepsilon_{(j-1)}^* + (1 - \varepsilon_{(j-1)}^*)\varepsilon_j] \right\}^b U_j^a (t_j/1000)^c; \quad (3)$$

$$\sigma_{Sj}^* = F(\sigma_{Sj}, \varepsilon_j, U_j, t_j, \tau_{nj}, \dots); \quad (4)$$

$$\varepsilon_j^* = 0,1 \left\{ \sigma_{Sj}^* / \left[(\sigma_{S0} U_j^a (t_j/1000)^c) \right] \right\}^{1/b}; \quad (5)$$

$$\Delta \sigma_{Sj}^* = \sigma_{Sj}^* - \sigma_{S0} (10 \varepsilon_j^*)^b U_{(j+1)}^a (t_{j+1}/1000)^c; \quad (6)$$

$$\sigma_{S(j+1)} = \sigma_{S0} \left\{ 10[\varepsilon_j^* + (1 - \varepsilon_j^*)\varepsilon_{(j+1)}] \right\}^b U_{(j+1)}^a (t_{(j+1)}/1000)^c + \Delta \sigma_{Sj}^*; \quad (7)$$

$$\sigma_{SC(j+1)} = \sigma_{S0} \left\{ 10 \left[\varepsilon_j^* + (1 - \varepsilon_j^*) \varepsilon_{(j+1)} \right] \right\} U_{C(j+1)}^a (t_{C(j+1)}/1000)^c + \Delta \sigma_{Sj}^*, \quad (8)$$

где j – порядковый номер очередного цикла деформационного нагружения; $\sigma_{Sj}^*, \varepsilon_j^*$ – сопротивление деформации и соответствующее ему согласно выражению (1), значение показателя степени деформации по окончании j -ой технологической паузы протяженностью τ_{nj} ; $F(\sigma_{Sj}, \varepsilon_j, U_j, t_j, \tau_{nj}, \dots)$ – используемая на основе известных [2, 8] и в достаточной степени широко апробированных решений функциональная связь, характеризующая интенсивность междеформационного разупрочнения данного металла или сплава; $\Delta \sigma_{Sj}^*$ – условный показатель, определяющий степень изменения σ_S при изменении скорости и температуры деформации.

Аналогичное численное рекуррентное решение, полученное по аналогии с (3)–(8) на основе зависимости (2), будет иметь вид [8]:

$$\sigma_{SCj} = \sigma_{S0} \left[\varepsilon_{(j-1)}^* + (1 - \varepsilon_{(j-1)}^*) \varepsilon_j \right]^{n_1} U_{Cj}^{n_2} \exp(-n_3 t_{Cj}); \quad (9)$$

$$\sigma_{SCj}^* = F(\sigma_{SCj}, \varepsilon_j, U_j, t_j, \tau_{nj}, \dots); \quad (10)$$

$$\varepsilon_j^* = \left\{ \sigma_{SCj}^* / \left[\sigma_{S0} U_{Cj}^{n_2} \exp(-n_3 t_{Cj}) \right] \right\}^{1/n_1}; \quad (11)$$

$$\Delta \sigma_{SCj}^* = \sigma_{SCj}^* - \sigma_{S0} \varepsilon_j^{*n_1} U_{C(j+1)}^{n_2} \exp(-n_3 t_{C(j+1)}); \quad (12)$$

$$\sigma_{SC(j+1)} = \sigma_{S0} \left[\varepsilon_j^* + (1 - \varepsilon_j^*) \varepsilon_{(j+1)} \right]^{n_1} U_{C(j+1)}^{n_2} \exp(-n_3 t_{C(j+1)}) + \Delta \sigma_{SCj}^*. \quad (13)$$

Была проведена количественная оценка предложенного алгоритма (3)–(8) применительно к температурно-деформационным условиям реализации процесса горячей прокатки стали 15ГЮТ ($\sigma_{S0} = 26$ МПа; $a = 0,126$; $b = 0,3$; $c = 2,74$ [1]), которая показала, что степень несоответствия между расчетными и эмпирическими значениями в относительном измерении не превысила $\pm 10\%$ (рис. 2).

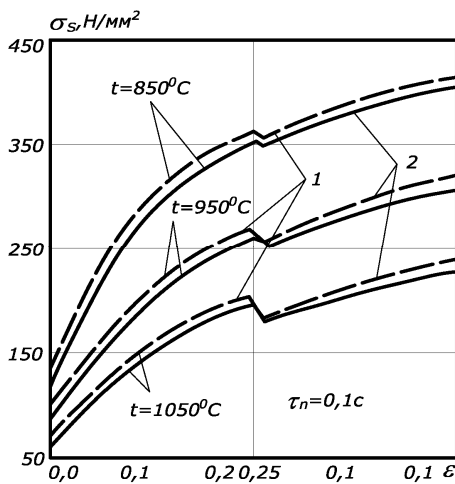


Рис. 2. Сопоставление расчетных (1) и эмпирических (2) распределений сопротивления деформации σ_s стали 15ГЮТ, имеющих место при двукратном пластическом деформировании

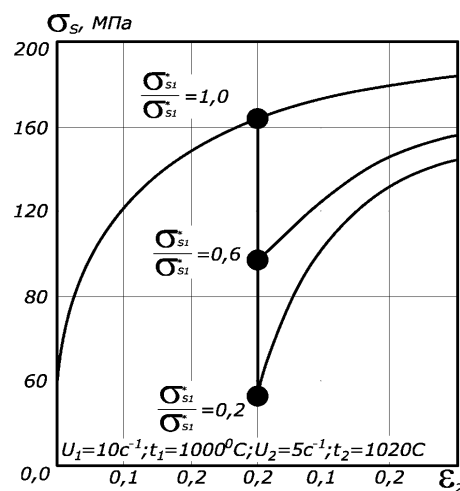


Рис. 3. Расчетные распределения сопротивления деформации σ_s стали 30ХГСА в зависимости от интенсивности междеформационного разупрочнения $\sigma_{S1}^*/\sigma_{S1}$ при двукратном пластическом деформировании, а также в зависимости от соотношения показателей скоростей u_1, u_2 и температуры t_1, t_2 деформации: $\sigma_{S0} = 92$ МПа; $a = 0,135$; $b = 0,25$; $c = -3,34$

Учет междеформационного разупрочнения при выполнении данных расчетов осуществляли на основе методики работы [8], а полученные в этом случае результаты свидетельствуют о возможности использования представленных зависимостей применительно к решению широкого круга задач, связанных с определением сопротивления деформации металла при многопроходной горячей прокатке.

Следует отметить, что структура алгоритмов (3)–(13) позволяет рассчитывать не только процессы деформации с технологическими паузами, но и процессы деформации, реализуемые при неизотермических условиях $[t_j \neq t_{j+1}]$, а также при наличии изменяющейся во времени скорости деформации $[U_j \neq U_{j+1}]$ (рис. 3).

Последнее, в свою очередь, позволяет рассчитывать как среднеинтегральные, так и локальные, т. е. текущие по длине очага деформации, значения сопротивления металла или сплава. Представляемые в этом случае расчетные распределения σ_{Sx} , полученные при различных законах изменения температуры t_x , показаны на рис. 1.

ВЫВОДЫ

Численные рекуррентные решения (3–13), позволяющие определить локальные характеристики сопротивления деформации, учитывающие реальный характер распределения степени, скорости и температуры по длине очага деформации, дают возможность корректно учесть процессы упрочнения-разупрочнения металла при горячей прокатке. Представленные в этом случае расчетные распределения σ_{Sxi} , полученные при различных законах изменения температуры t_{xi} , а также сопоставление эмпирических и расчетных данных соответствующих среднеинтегральных оценок, подтверждают возможность использования указанных зависимостей применительно к разработке и последующей численной реализации целого ряда численных одномерных математических моделей различных технологических схем процесса горячей прокатки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Полухин П. И. *Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов: справочник* / П. И. Полухин, Г. Я. Гунн, А. М. Галкин. – М.: Металлургия, 1983 – 352 с.
2. Ефимов В. Н. *Сопротивление деформации в процессах прокатки* / В. Н. Ефимов, М. Я. Бровман. – М.: Металлургия, 1996 – 253 с.
3. Андреюк Л. В. *Аналитические зависимости сопротивления деформации металла от температуры и степени деформации* / Л. В. Андреюк, Г. Г. Томленов // *Сталь*. – 1972. – № 9. – С. 545–547.
4. Целиков А. И. *Теория продольной прокатки* / А. И. Целиков, Г. С. Никитин, С. Е. Рокотян. – М.: Металлургия, 1980. – 320 с.
5. Бровман М. Я. *Применение теории пластичности в прокатке* / М. Я. Бровман. – М.: Металлургия, 1991. – 265 с.
6. *Компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением* / В. Н. Данченко, А. А. Миленин, В. И. Кузьменко, В. А. Гриневич. – Днепропетровск: Системные технологии, 2005. – 448 с.
7. Сатонин А. В. *К расчету сопротивления деформации металлов и сплавов при их горячей прокатке* / А. В. Сатонин // *Известия вузов. Черная металлургия*. – 1999. – № 4. – С. 74–75.
8. *Определение интегральных показателей напряженно-деформированного состояния металла при горячей прокатке* / Л. Н. Соколов, В. Ф. Потапкин, В. Н. Ефимов и др. // *Металлургия и коксохимия*. – 1987. – Вып. 94. – С. 7–10.

Добронос Ю. К. – канд. техн. наук, доц. ДГМА;
Смолякова В. В. – аспирант ДГМА;
Настоящая С. С. – студент ДГМА;
Бурдов И. С. – студент ДГМА.

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

E-mail: amm@dgma.donetsk.ua