

УДК 539.374.6

Путники А. Ю.

## АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНЫХ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СРЕД В УСЛОВИЯХ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ

Известно достаточно много работ, посвященных изучению свойств пластической среды и, в частности, зависимости сопротивления пластической деформации от термомеханических параметров процесса (степени, скорости деформации и температуры). Простейшие математические модели позволяют определить силовые факторы пластического течения в зависимости от деформационных параметров только по возрастающей схеме. Примером могут служить зависимости Зюзина–Бровмана [1].

$$\sigma_T = \sigma_1 \cdot (\varepsilon)^{T_1} \cdot (\dot{\varepsilon})^{T_2} \cdot \exp(T_3 T) \quad (1)$$

где  $\sigma_T$  – предел текучести, определяемый маркой стали;  $\sigma_1$  – базовый предел текучести;  $\varepsilon$  – степень высотной деформации;  $\dot{\varepsilon}$  – скорость деформации;  $T$  – температура металла;  $T_i$  – постоянная, определяемая маркой стали.

Аналогичная схема нагружения имеет место и в модели Андреюка–Тюленева [2]

$$\sigma_T = \sigma_0 \cdot (\varepsilon)^{T_1} \cdot (\dot{\varepsilon})^{T_2} \cdot (T)^{m_3} \quad (2)$$

Существуют экспериментальные данные, которые показывают более сложное влияние деформационных параметров на силовые характеристики пластического формоизменения [3]. Наряду с увеличением напряжения текучести наблюдается его уменьшение при увеличении деформации (рис. 1).

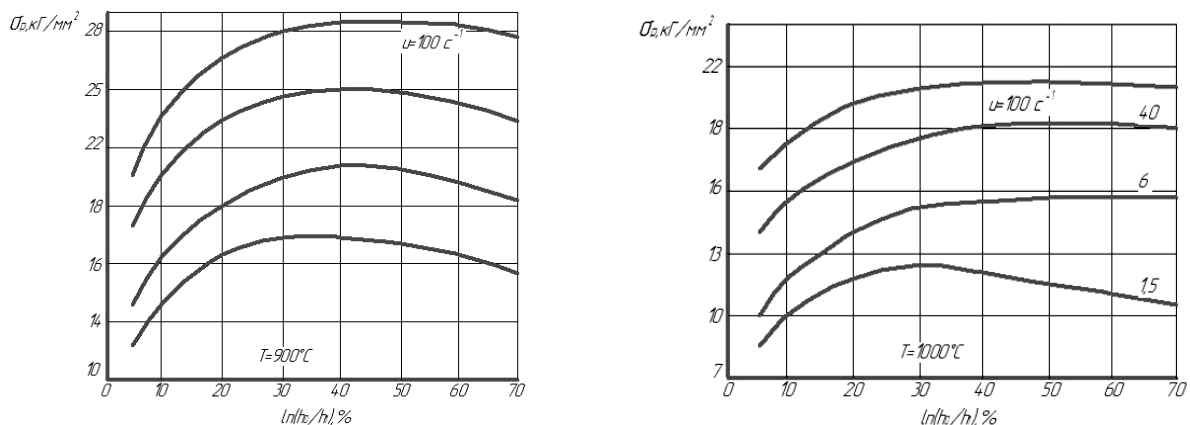


Рис. 1. Предел текучести среднеуглеродистой стали при разных скоростях деформации и

Из рис. 1 видно, что убывающий характер кривых определяется также скоростью деформации.

Пластическая среда в процессе деформационного воздействия на разных этапах нагружения имеет разную реологию, определяемую термомеханическими параметрами и химическим составом стали. Возникает необходимость анализа и адекватного моделирования механических, физических свойств среды в условиях сложного реологического нагружения.

Цель работы – проанализировать сложную среду в условиях термомеханического нагружения.

Современные математические модели отличаются более сложными аналитическими зависимостями, позволяющими описать сложные реологические свойства материалов [3–5].

Расширяются функциональные возможности деформационных факторов, которые в сочетании с температурой, скоростью деформации, оказывают разное действие на силовые параметры механической среды.

В работе [3] такая зависимость использована в сочетании со скоростным фактором

$$\sigma_T = \alpha_1 \cdot \varepsilon^{(\alpha_2 + \alpha_3 T + \alpha_4 \cdot \dot{\varepsilon})} \cdot \exp(\alpha_5 \cdot \varepsilon) \cdot u^{(\alpha_6 + \alpha_7 \cdot T)} \cdot \exp(\alpha_8 \cdot T), \quad (3)$$

Формула Галкина [5] напоминает выражение Зюзина–Бровмана, однако отличается убывающей экспоненциальной функцией:

$$\sigma_T = \sigma_0 \cdot \dot{\varepsilon}^T \cdot \varepsilon^n \cdot \exp(-q\varepsilon) \cdot \exp(-pT) \quad (4)$$

Более сложные модели (3), (4) объясняются более сложной реологией пластической среды, которые выявляются исследовательскими современными комплексами.

В последнее время все большее распространение получает модель Хензеля–Шпиттеля [6]:

$$\sigma_T = \alpha_1 \varepsilon^{\alpha_2} \cdot \exp\left(\frac{\alpha_3}{\varepsilon}\right) \cdot \exp(\alpha_4 \varepsilon) (1 + \varepsilon)^{\alpha_5 \cdot T} \cdot \dot{\varepsilon}^{\alpha_6} \cdot \dot{\varepsilon}^{\alpha_7 \cdot T} \cdot T^{\alpha_8} \cdot \exp(\alpha_9 \cdot T) \quad (5)$$

где  $\alpha_i$  – коэффициенты.

Выражение (5) характеризуется произведением 9 разных функций, способных как увеличивать, так и уменьшать сложное воздействие отдельных термомеханических параметров. Сложное воздействие степени деформации определяется четырьмя функциями:

$$\alpha_1 \varepsilon^{\alpha_2} \cdot \exp\left(\frac{\alpha_3}{\varepsilon}\right) \cdot \exp(\alpha_4 \varepsilon) (1 + \varepsilon)^{\alpha_5 \cdot T} \quad (6)$$

Значимость каждой функции определяется коэффициентами  $\alpha_1 \dots \alpha_5$  и характером изменения самой функции. Последний множитель показывает частное влияние температуры через степень деформации. Скорость деформации функционально находится в соответствии со степенью деформации (2). Имеет место зависимость степени, скорости деформации от температурного фактора:

$$\varepsilon^{\alpha_2} \cdot (1 + \varepsilon)^{\alpha_5 \cdot T} \rightarrow \dot{\varepsilon}^{\alpha_6} \cdot \dot{\varepsilon}^{\alpha_7 \cdot T}.$$

Температурный фактор в выражении (5) определяется комбинированной зависимостью Зюзина–Бровмана и Андреюка–Тюленева

$$T^{\alpha_8} \cdot \exp(\alpha_9 \cdot T) \quad (7)$$

Неоднозначное влияние температуры определяется коэффициентами  $\alpha_8$  и  $\alpha_9$ , их знаками и разным действием функций (7).

Если в выражении (5) принять  $\alpha_3 = \alpha_4 = \alpha_5 = \alpha_7 = \alpha_8 = 0$ , получим формулу Зюзина–Бровмана (1):

$$\sigma_T = \alpha_1 \cdot \varepsilon^{\alpha_2} \cdot \dot{\varepsilon}^{\alpha_6} \cdot \exp(\alpha_9 \cdot t).$$

Принимая в (5)  $\alpha_3 = \alpha_4 = \alpha_5 = \alpha_7 = \alpha_9 = 0$ , получим выражение Андреюка–Тюленева (2):

$$\sigma_T = \alpha_1 \cdot \varepsilon^{\alpha_2} \cdot \dot{\varepsilon}^{\alpha_6} \cdot T^{\alpha_8}.$$

Можно получить и другие сочетания. Модель Хензеля–Шпиттеля носит более общий характер, при этом возможны такие сочетания коэффициентов  $\alpha_i$ , при которых напряжения текучести имеют более сложные схемы нагружения.

На пластометре Gleeble 3800 экспериментально исследованы две марки стали с максимальной степенью деформации  $\varepsilon = 1,2$  при различных температурах и скоростях деформации. В табл. 1 приведен химический состав исследуемых сталей.

В соответствии с программой эксперимента определяются коэффициенты выражения (5). Результаты пересчета представлены в табл. 2.

Таблица 1

Химический состав исследуемых сталей

Сталь	C, %	Si, %	Mn, %	S, %	P, %	Cr, %	Ni, %	Cu, %	As, %
Малоуглер. (м.у.)	0,20	0,24	0,48	0,009	0,004	0,04	0,02	0,03	0,08
Среднеуглер. (с.у.)	0,46	0,29	0,6	0,009	0,018	0,25	0,15	0,15	0,09

Таблица 2

Коэффициенты  $\alpha_1$ -  $\alpha_9$  для исследуемых сталей

Сталь	Коэффициенты								
	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	$\alpha_5$	$\alpha_6$	$\alpha_7$	$\alpha_8$	$\alpha_9$
Малоуглер. (м.у.)	82,811	0,2133	0,001	-0,0003	-0,3630	-0,0323	0,0002	0,6448	-0,0039
Среднеуглер. (с.у.)	1266,5	0,2997	-0,0005	-0,0004	-0,2028	-0,2282	0,0003	0,3392	-0,0036

На рис. 2–4 показаны экспериментальные и расчетные данные напряжения текучести  $\sigma_f$  в зависимости от степени, скорости деформации, температуры и химического состава. Среднеуглеродистая сталь практически по всем элементам химического состава превосходит малоуглеродистую сталь, что нашло отражение в характеристиках силового нагружения. Для всех термомеханических параметров двух марок стали не обнаружено постоянно возрастающей схемы силового воздействия. Начиная с  $\varepsilon = 0,3 \dots 0,5$ , формируется либо максимум функции с постепенным ее убыванием, либо изменение функции происходит в незначительных пределах. Экспериментальные данные для двух марок стали хорошо укладываются в модель Хензеля–Шпиттеля как по деформационным, скоростным, температурным параметрам, так и по химическому составу (рис. 2–4). Выражение Хензеля–Шпиттеля расширяет возможности аналитического моделирования сложной реологической среды, которой обладает большинство углеродистых и легированных марок стали. Это позволяет правильно учесть и рассчитать фактор деформационного упрочнения на силовые, деформационные, скоростные и температурные параметры процесса, выявить определяющие механизмы пластической деформации.

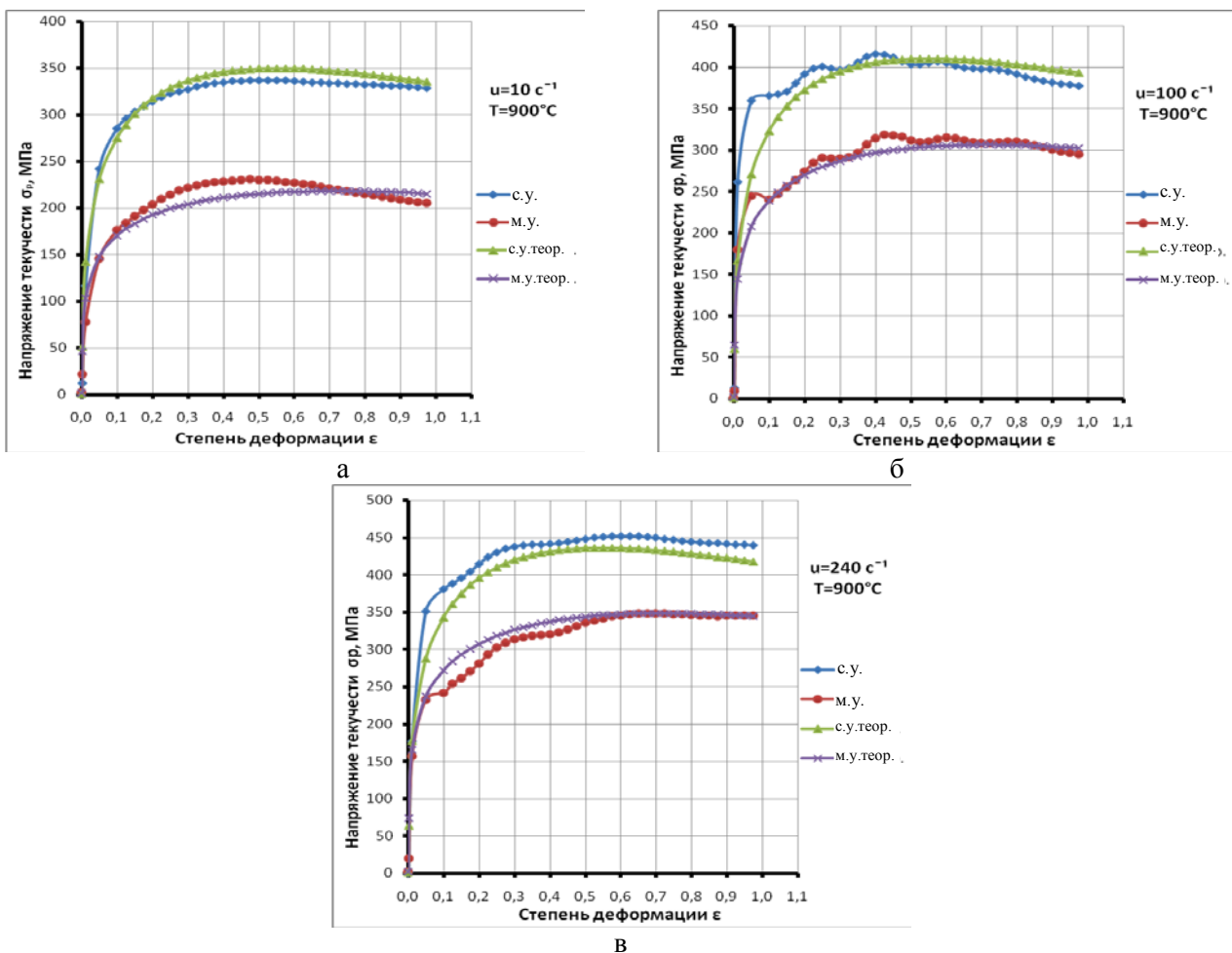


Рис. 2 Графики экспериментальных и теоретических зависимостей напряжения текучести от степени деформации при  $T = 900^\circ\text{C}$  и: а –  $u = 10 \text{ c}^{-1}$ , б –  $u = 100 \text{ c}^{-1}$ , в –  $u = 240 \text{ c}^{-1}$  для исследуемых сталей

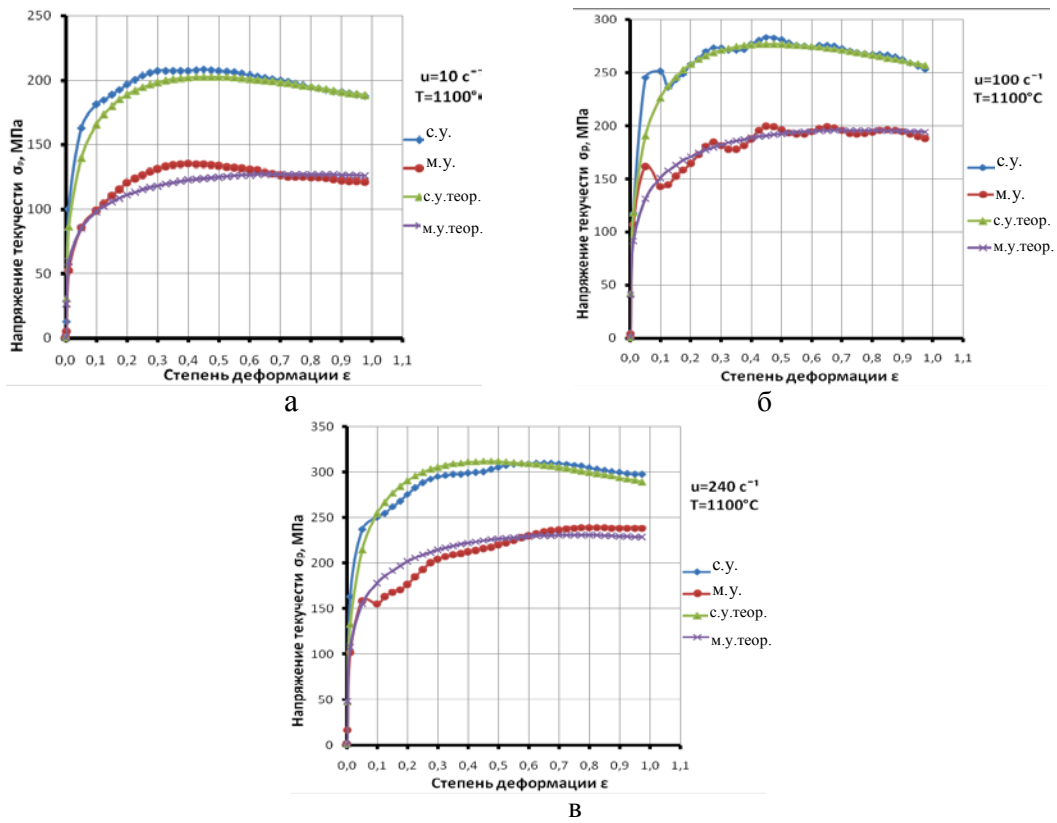


Рис. 3. Графики экспериментальных и теоретических зависимостей напряжения текучести от степени деформации при  $T = 1100^\circ\text{C}$  и : а –  $u = 10 \text{ c}^{-1}$ , б –  $u = 100 \text{ c}^{-1}$ , в –  $u = 240 \text{ c}^{-1}$  для исследуемых сталей

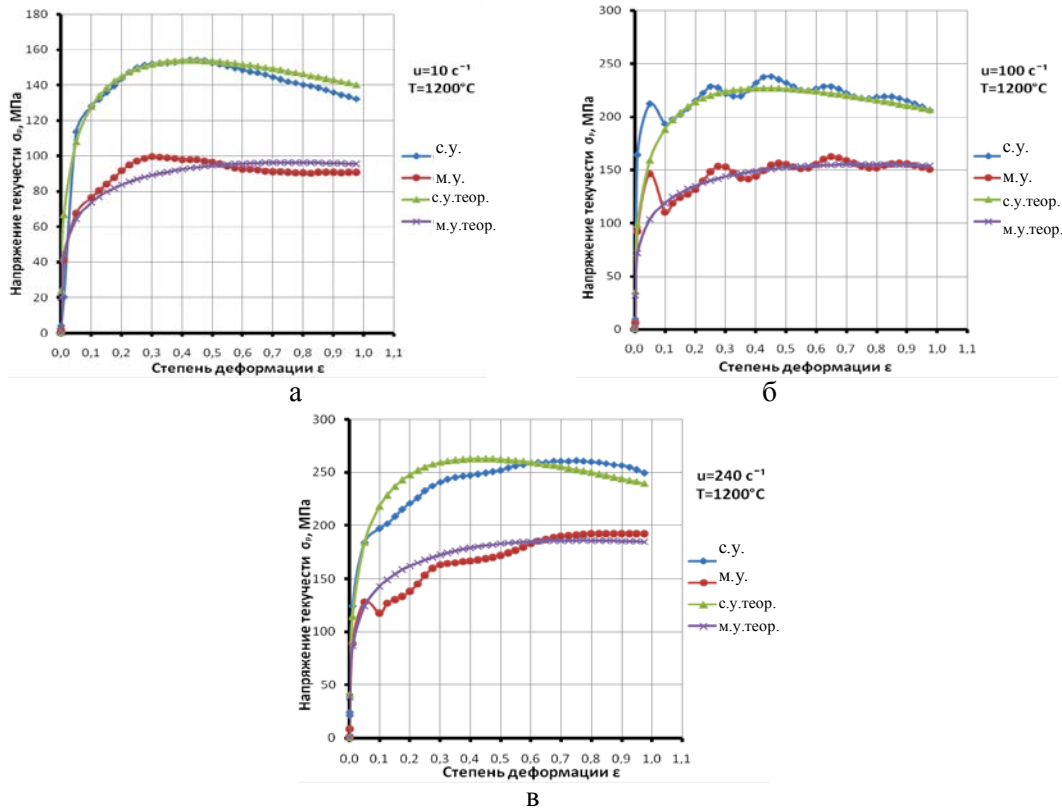


Рис. 4. Графики экспериментальных и теоретических зависимостей напряжения текучести от степени деформации при  $T = 1200^\circ\text{C}$  и : а –  $u = 10 \text{ c}^{-1}$ , б –  $u = 100 \text{ c}^{-1}$ , в –  $u = 240 \text{ c}^{-1}$  для исследуемых сталей

## ВЫВОДЫ

1. Простейшие математические модели механических характеристик стали в условиях горячей обработки характеризуют влияние деформационных и скоростных параметров по возрастающей силовой схеме.

2. Реальные свойства сталей, сплавов характеризуются сложной реологией и силовой схемой нагружения.

3. Современные марки сталей со сложной реологией среды определяются комбинированным характером влияния термомеханических параметров на сопротивление пластической деформации.

4. Сложная аналитическая модель Хензеля-Шпиттеля позволяет правильно качественно и количественно определить влияние термомеханических факторов на напряжение текучести в процессе деформационного нагружения.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Сопротивление деформации сталей при горячей прокатке* / В. И. Зюзин, М. Я. Бровман [и др.] // М. : *Металлургия*, 1964. – 270 с.
2. *Андреюк Л. В. Аналитическая зависимость сопротивления деформации сталей и сплавов от их химического состава* / Л. В. Андреюк, Г. Г. Тюленев, Б. С. Прицкер // *Сталь*. –1972. –№ 6. – С. 825–828.
3. *Cook P. M. The real curves, stress rate of deformation for the steels by reduction* / P. M. Cook / *The Institution of Mechanion Engineer*. – 1957. – P. 75–77.
4. *Technologia i modelowanie procesu walcowania prętów okrągłych o zawężonej tolerancji wymiarowej* / Henryk Dyja, Sebastian Mroz, Piotr Sygut, Mariola Sygut. – Czenstohowa, 2012. – 171 s.
5. *Galkin A. M. Badania plastometryczne własności reologicznych metali i stopov* / A. M. Galkin, E. Labuda, H. Dyja // *Podsumowanie prac. II Konferencja Badania Plastometryczne w Przerobce Plastycznej*. – Czestochowa, 1988. – S. 2–9.
6. *Henzel A. Raschet energosilovych parametrov v processakh obrobki metallov davlenijem* / A. Henzel, T. Spittel. – Moskva, 1982.

## REFERENCES

1. *Soprotivlenie deformacii stalej pri gorjachej prokatke* / V. I. Zjuzin, M. Ja. Brovman [i dr.] // M. : *Metallurgija*, 1964. – 270 s.
2. *Andrejuk L. V. Analiticheskaja zavisimost' soprotivlenija deformacii stalej i splavov ot ih hi-micheskogo sostava* / L. V. Andrejuk, G. G. Tjulenev, B. S. Pricker // *Stal'*. –1972. –№ 6. – С. 825–828.
3. *Cook P. M. The real curves, stress rate of deformation for the steels by reduction* / P. M. Cook / *The Institution of Mechanion Engineer*. – 1957. – P. 75–77.
4. *Technologia i modelowanie procesu walcowania prętów okrągłych o zawężonej tolerancji wymiarowej* / Henryk Dyja, Sebastian Mroz, Piotr Sygut, Mariola Sygut. – Czenstohowa, 2012. – 171 s.
5. *Galkin A. M. Badania plastometryczne własności reologicznych metali i stopov* / A. M. Galkin, E. Labuda, N. Dyja // *Podsumowanie prac. II Konferencja Badania Plastometryczne w Przerobce Plastycznej*. – Czestochowa, 1988. – S. 2–9.
6. *Henzel A. Raschet energosilovych parametrov v processakh obrobki metallov davlenijem* / A. Henzel, T. Spittel. – Moskva, 1982.

Путноки А. Ю. – канд. техн. наук, докторант кафедры ОМД ЗНТУ.

ЗНТУ – Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье.

E-mail: al.putnoki@gmail.com

Статья поступила в редакцию 20.09.2015 г.