

УДК 621.771.22

Шейко С. П.

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ТЕКУЧЕСТИ СТАЛИ 10ХФБТЧ ПРИ РАЗНЫХ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРАХ**

Для разработки технологий обработки новых сплавов и совершенствования действующих технологий их обработке необходимо знать напряжение текучести, пластичность металлов и их сплавов. Напряжение текучести металлов  $\sigma_s$  является одной из основных характеристик их технологической деформируемости.

До настоящего времени закономерности, необходимые для нахождения истинного сопротивления деформации сплава, недостаточно изучены. Поэтому на практике для определения  $\sigma_s$  используют экспериментальные данные в виде конкретных дискретных значений для определенных условий деформирования и марок стали или зависимости, аппроксимирующие экспериментальные данные.

Одним из эффективных способов исследования напряжения текучести являются испытания металлов на пластометрах, которые могут дать обширную картину свойств обрабатываемых давлением металлов в режимах, моделирующих термомеханические параметры технологических процессов обработки металлов давлением в широком диапазоне их изменения.

Имеющиеся в технической литературе данные о скоростной зависимости напряжения текучести сталей нередко противоречивы и не всегда позволяют однозначно судить о влиянии того или иного фактора. Не корректное математическое описание напряжения текучести при разработке технологических процессов может привести к значительным ошибкам в расчетах сил и моментов прокатки.

В разных работах проводились экспериментальные исследования, определившие зависимость предела текучести  $\sigma_T$ , напряжения текучести  $\sigma_p$  от термомеханических параметров процесса (степени, скорости деформации, температуры).

Обширные экспериментальные исследования для разных марок стали выполнили П. М. Кук [1], А. А. Динник [2], В. И. Зюзин и другие авторы [3–5].

Цель работы – экспериментально определить напряжение текучести стали 10ХФБТч при разных термомеханических параметрах.

Имеются ряд формул зависимости напряжения текучести от скорости деформации:

1) Формула Зюзина:

$$\sigma_p = \sigma_0 \cdot A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot \varepsilon^{m_1} \cdot u^{m_2} \cdot \exp(m_3 T), \quad (1)$$

где  $\varepsilon$ ,  $u$  – средняя степень и скорость деформации;

$T$  – температура среды.

2) Формула Е. Зибеля и А. Помпа:

$$\sigma = \sigma_0 + b \cdot u^m, \quad (2)$$

где  $\sigma_0$  – предел текучести при статической деформации, кг/мм<sup>2</sup>;

$b$  и  $m$  – постоянные коэффициенты, зависящие от материала.

3) Формула Андреюка:

$$\sigma = A \sigma_0 \cdot u^B (10\varepsilon)^C \left( \frac{T}{1000} \right)^D. \quad (3)$$

В этой формуле учитывается влияние свойств материала, степени деформации, скорости деформации и температуры.

4) Формула А. Надаи:

$$\sigma = \sigma_0 + m \cdot \ln \frac{u}{u_0}, \quad (4)$$

где  $m$  – постоянный коэффициент, зависящий от материала.

Основной недостаток этой формулы является отсутствие значений коэффициентов, входящих в их состав, для различных металлов и сплавов.

5) Формула А. И. Целикова и В. А. Персиянцева:

$$\sigma = \sigma_0 + D \frac{A}{u} \left( 1 - e^{-\frac{A\varepsilon}{u}} \right), \quad (5)$$

где  $D$  – модуль упрочнения, кг/мм<sup>2</sup>;

$A$  – коэффициент пропорциональности, представляющий собой скорость релаксации, с<sup>-1</sup>;

$\sigma_0$  – предел текучести при статической деформации, кг/мм<sup>2</sup>;

$u$  – средняя скорость деформации, с<sup>-1</sup>.

Для описания изменения напряжения текучести, в зависимости от логарифмической деформации, температуры и скорости деформации используют математические модели, которые представлены в работах [6, 7].

В работе [7] представлено 11 формул для определения напряжений текучести (табл. 1).

Таблица 1

## Отобранные функции напряжения текучести для аппроксимации

№	Формула
1	$\sigma_p = \alpha_1 + \alpha_2 \varepsilon + \alpha_3 u + \alpha_4 T$
2	$\sigma_p = \alpha_1 \varepsilon^{\alpha_2} u^{\alpha_3} \exp(-T \alpha_4)$
3	$\sigma_p = \alpha_1 + \alpha_2 \varepsilon + \alpha_3 u + \alpha_4 T + \alpha_5 \varepsilon u + \alpha_6 \varepsilon T + \alpha_7 T u + \alpha_8 \varepsilon^2 + \alpha_9 u^2 + \alpha_{10} T^2$
4	$\sigma_p = \alpha_1 + \alpha_2 \varepsilon + \alpha_3 u + \alpha_4 T + \alpha_5 \varepsilon^2 + \alpha_6 u^2 + \alpha_7 T^2$
5	$\sigma_p = \alpha_1 + \alpha_2 \varepsilon + \alpha_3 u + \alpha_4 T + \alpha_5 \varepsilon u T^2$
6	$\sigma_p = \sqrt{3} \alpha_1 (\bar{\varepsilon} + \varepsilon_0)^{\alpha_2} (\bar{\varepsilon} + \varepsilon_0)^{\alpha_3} \exp\left(\frac{\alpha_4}{T}\right)$
7	$\sigma_p = \alpha_1 \varepsilon^{\alpha_2} \exp(\alpha_3 \varepsilon) u^{\alpha_4} \exp(\alpha_5 T)$
8	$\sigma_p = \alpha_1 + \alpha_2 \varepsilon + \alpha_3 u + \alpha_4 T + \alpha_5 \varepsilon^2 + \alpha_6 u^2 + \alpha_7 T^2 + \alpha_8 \varepsilon^3$
9	$\sigma_p = \alpha_1 + \alpha_2 \varepsilon + \alpha_3 u + \alpha_4 T + \alpha_5 \varepsilon^2 + \alpha_6 u^2 + \alpha_7 T^2 + \alpha_8 \varepsilon^3 + \alpha_9 \varepsilon^4$
10	$\sigma_p = \alpha_1 \varepsilon^{(\alpha_2 + \alpha_3 T + \alpha_4 u)} \exp(\alpha_5 \varepsilon) u^{(\alpha_6 + \alpha_7 T)} \exp(\alpha_8 T)$
11	$\sigma_p = \alpha_1 \varepsilon^{\alpha_2} \exp\left(\frac{\alpha_3}{\varepsilon}\right) \exp(\alpha_4 \varepsilon) (1 + \varepsilon)^{\alpha_5 T} u^{\alpha_6} u^{\alpha_7 T} T^{\alpha_8} \exp(\alpha_9 T)$

Где  $\sigma_p$  – напряжение текучести;  $\varepsilon$  – степень деформации;  $u$  – скорость деформации;  $T$  – температура деформации;  $\alpha_1 \dots \alpha_9$  – постоянные коэффициенты.

Выражения (1)–(5) в общем виде правильно отражают влияние термомеханических параметров процесса на предел текучести  $\sigma_T$  разных марок сталей. С увеличением степени и скорости деформации напряжения растут, уменьшаются при увеличении температуры.

В табл. 1 приведены формулы для определения напряжения текучести  $\sigma_p$ . Выражения (1)–(9) такую зависимость подтверждают. Отличие предела текучести и напряжения текучести заключается в том, что предел текучести определяет напряжение в пластической зоне в начале нагружения, а напряжение текучести определяется в процессе нагружения. Напряжение текучести является характеристикой реологических свойств материала. В этой связи, представленные выше зависимости, не отражают в полной мере реологию материала. Они могут не только расти с увеличением степени деформации, но и уменьшаться или оставаться неизменными.

В этой связи представляет интерес выражение 11, табл. 1, формула Хензеля-Шпиттеля [6]. Проанализируем ее. Зависимости:

$$\alpha_1 \varepsilon^{\alpha_2}; \exp(\alpha_4 \varepsilon); (1 + \varepsilon)^{\alpha_5 T},$$

с увеличением степени деформации  $\varepsilon$ , увеличивается напряжение текучести  $\sigma_p$ .

Зависимость:

$$\exp\left(\frac{\alpha_3}{\varepsilon}\right),$$

способствует снижению напряжения текучести.

Зависимость:

$$u^{\alpha_6}; u^{\alpha_7 T},$$

с увеличением скорости деформации увеличивается напряжение текучести.

Зависимость:

$$(1 + \varepsilon)^{\alpha_5 T}; u^{\alpha_7 T}; T^{\alpha_8}; \exp(\alpha_9 T),$$

могут увеличивать или уменьшать напряжение текучести, в зависимости от соотношений термомеханических параметров.

Таким образом, выражение Хензеля-Шпиттеля может описывать кривую зависимости напряжений от термомеханических параметров с разным изменением значений. Экспериментальные данные подтверждают это.

Графики показывают, что в случае малых деформаций ( $\varepsilon = 0,2-0,3$ ) предел текучести сильно растет по мере повышения деформации. При средних деформациях ( $\varepsilon > 0,3$ ) этот рост предела текучести становится менее интенсивным, и в ряде случаев при дальнейшем повышении деформации, он уменьшается.

Предварительный анализ математических моделей, проведенный выше, показал, что наиболее приемлемой формулой для определения напряжения текучести при разных термомеханических параметрах является:

$$\sigma_p = \alpha_1 \varepsilon^{\alpha_2} \exp\left(\frac{\alpha_3}{\varepsilon}\right) \exp(\alpha_4 \varepsilon) (1 + \varepsilon)^{\alpha_5 T} u^{\alpha_6} u^{\alpha_7 T} T^{\alpha_8} \exp(\alpha_9 T). \quad (6)$$

Для определения коэффициентов в формуле (6)  $\alpha_1 - \alpha_9$  можно использовать, экспериментальные данные, представленные на рис. 1-2.

Предварительный анализ экспериментальных данных показывает, что механические характеристики новой марки стали 10ХФБТч в значительной степени определяется термомеханическими параметрами пластической деформации: скоростью деформации, степенью деформации и температурой.

Составляется система уравнений, решением которых являются указанные коэффициенты.

К примеру, при  $T = 850^\circ\text{C}$ ,  $\varepsilon = 0,4$ ,  $u = 1 \text{ с}^{-1}$ ,  $\sigma_T = 225 \text{ МПа}$  и при  $T = 900^\circ\text{C}$ ,  $\varepsilon = 0,6$ ,  $u = 10 \text{ с}^{-1}$ ,  $\sigma_T = 250 \text{ МПа}$  и т. д. Получаем систему уравнений:

$$1) 225 = \alpha_1 0,4^{\alpha_2} \exp\left(\frac{\alpha_3}{0,4}\right) \exp(\alpha_4 0,4) (1 + 0,4)^{\alpha_5 \cdot 850} 1^{\alpha_6} 1^{\alpha_7 \cdot 850} 850^{\alpha_8} \exp(\alpha_9 850)$$

$$2) 250 = \alpha_1 0,6^{\alpha_2} \exp\left(\frac{\alpha_3}{0,6}\right) \exp(\alpha_4 0,6) (1 + 0,6)^{\alpha_5 \cdot 900} 10^{\alpha_6} 10^{\alpha_7 \cdot 900} 900^{\alpha_8} \exp(\alpha_9 900)$$

$$3) \dots\dots\dots$$

$$n) \dots\dots\dots$$

Данная система уравнений, с использованием метода планирования эксперимента перечитывается таким образом, чтобы определить коэффициенты  $\alpha_1 - \alpha_9$ . Переработанные экспериментальные данные в соответствии с программой Reology позволили определить коэффициенты  $\alpha_i$  (табл. 2).

Таблица 2

Коэффициенты, полученные при аппроксимации

$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	$\alpha_5$	$\alpha_6$	$\alpha_7$	$\alpha_8$	$\alpha_9$
0,000 082	0,524 152	-0,000 163	1,113 630	-0,003 363	-0,216 846	0,000 336	2,970 980	-0,004 952

На рис. 1 и 2 представлены сопоставительные кривые (аппроксимирующие и экспериментальные), при разных температурах и скоростях деформации.

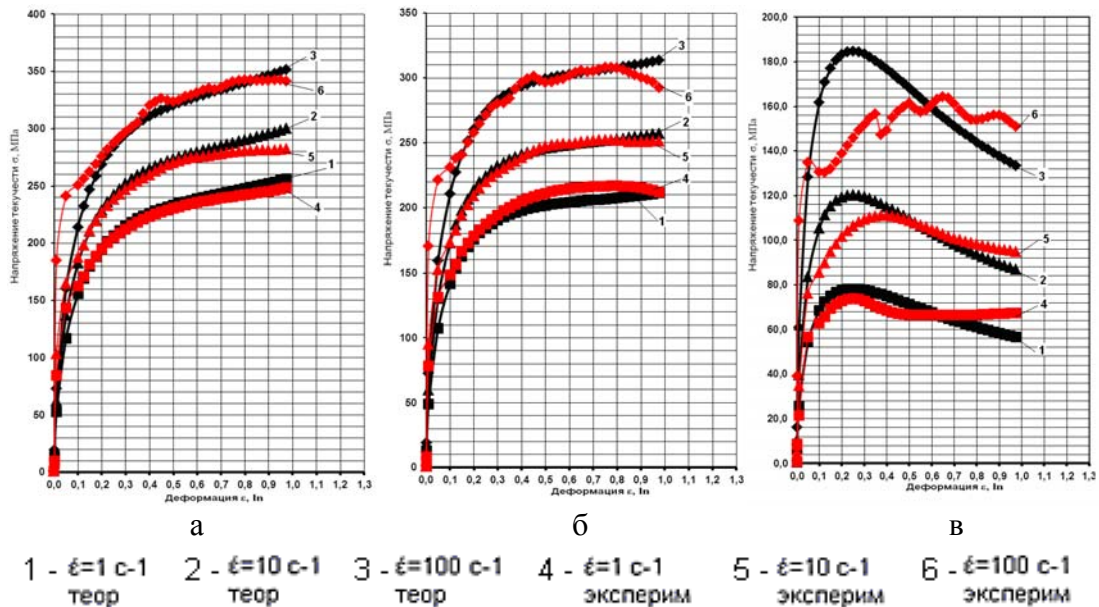


Рис. 1. Сопоставление зависимостей напряжения текучести от деформации: а –  $T = 850^\circ\text{C}$ ; б –  $T = 900^\circ\text{C}$ ; в –  $T = 1200^\circ\text{C}$

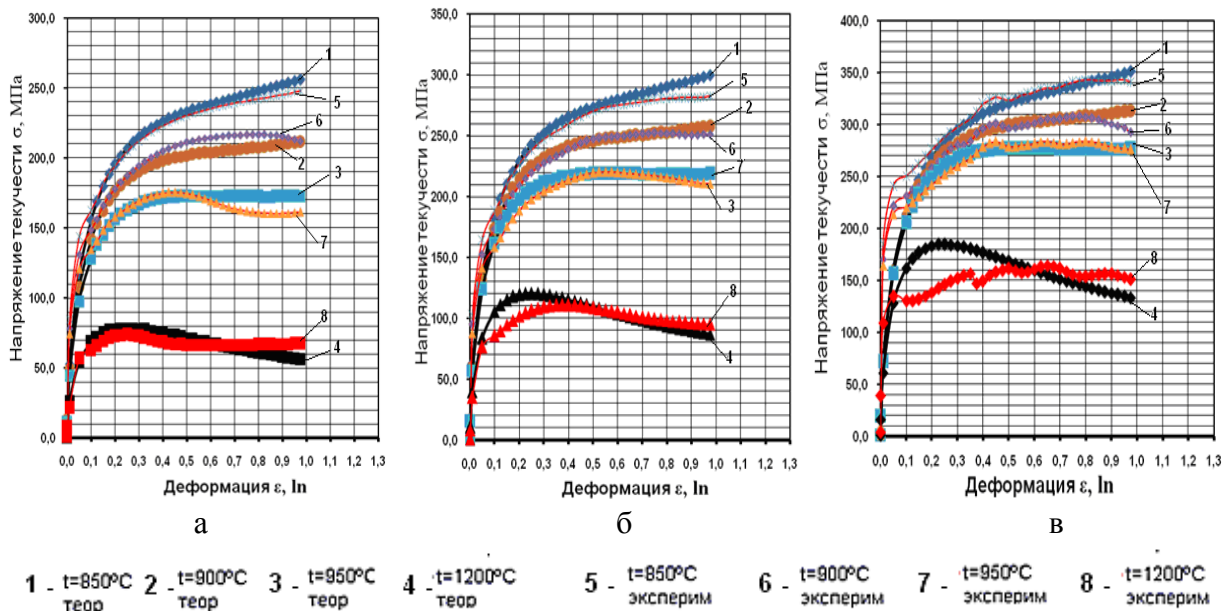


Рис. 2. Сопоставление зависимостей напряжения текучести от деформации: а –  $u = 1 \text{ с}^{-1}$ ; б –  $u = 10 \text{ с}^{-1}$ ; в –  $u = 100 \text{ с}^{-1}$ .

Анализ графиков показывает сопоставимость экспериментальных и теоретических данных, за исключением кривой, при  $T = 1200^\circ\text{C}$ . При скорости деформации  $u = 100 \text{ с}^{-1}$  наблюдается значительное отклонение практической кривой при  $\epsilon = 0,1$  до  $\epsilon = 0,5$ .

Особенностью данной аппроксимации является то, что с помощью полученной формулы можно учитывать реологию различных марок сталей. Зависимость напряжения текучести от деформации может быть возрастающей, убывающей и не изменяющийся.

Такую формулу можно использовать для расчетов энергосиловых параметров и напряжения текучести металла в каждой точке очага деформации.

### ВЫВОДЫ

Анализ математических моделей пластических сред показал, что самой оптимальной функцией для определения напряжения текучести металла является формула Хензеля-Шпиттеля. С помощью данной формулы получены теоретические зависимости напряжения текучести для разных термомеханических параметров.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Динник А. А. *Истинные пределы текучести стали при горячей прокатке* / А. А. Динник // *Теория прокатки: сб. научн. трудов.* – М. : *Металлургиядат*, 1962. – С. 157–173.
3. Третьяков А. В. *Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением* / А. В. Третьяков, В. И. Зюзин. – М. : *Металлургия*, 1973. – 224 с.
4. Полухин П. И. *Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов: справочник* / П. И. Полухин, Г. Я. Гун, А. М. Галкин. – М. : *Металлургия*, 1983. – 350 с.
5. *Механические свойства стали при горячей обработке давлением* / И. Я. Тарновский, А. А. Поздеев, Л. В. Меандров [и др.]. – Свердловск : *Металлургиядат*, 1960. – 260 с.
6. Henzel A. *Raschet energosilovykh parametrov v processakh obrobтки metallo davlenijem* / A. Henzel, T. Spittel. – М. : *Metallurgija*, 1982.
7. Coukhar G. *Silovye vozdejstvija pri prokatke v vytyazhnykh kalibrakh* / G. Coukhar. – М. : *Metallurgija*, 1963.

### REFERENCES

1. 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.
2. Dinnik A. A. *Istinnye predely tekuchesti stali pri gorjachej prokatke* / A. A. Dinnik // *Teorija prokatki: sb. nauchn. trudov.* – М. : *Metallurgidat*, 1962. – P. 157–173.
3. *Tret'jakov A. V. Mehanicheskie svojstva metallo i splavov pri obrabotke davleniem* / A. V. Tret'jakov, V. I. Zjuzin. – М. : *Metallurgija*, 1973. – 224 p.
4. *Poluhin P. I. Soprotivlenie plasticheskoy deformacii metallo i splavov: spravochnik* / P. I. Poluhin, G. JA. Gun, A. M. Galkin. – М. : *Metallurgija*, 1983. – 350 p.
5. *Mehanicheskie svojstva stali pri gorjachej obrabotke davleniem* / I. JA. Tarnovskij, A. A. Pozdeev, L. V. Meandrov [i dr.]. – Sverdlovsk : *Metallurgizdat*, 1960. – 260 p.
6. Henzel A. *Raschet energosilovykh parametrov v processakh obrobтки metallo davlenijem* / A. Henzel, T. Spittel. – М. : *Metallurgija*, 1982.
7. Coukhar G. *Silovye vozdejstvija pri prokatke v vytyazhnykh kalibrakh* / G. Coukhar. – М. : *Metallurgija*, 1963.

Шейко С. П. – канд. техн. наук, докторант ЗНТУ

ЗНТУ – Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье.

E-mail: [sheyko.s@mail.ru](mailto:sheyko.s@mail.ru)