

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ДЕФОРМАЦИИ НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ ДЛЯ КОЛЕСНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Шейко С. П.

Для низколегированной стали, применяемой, в колесном производстве установлены закономерности пластического формоизменения в условиях горячего деформирования. Получена регрессионная модель расчета сопротивления деформации стали 10ХФБТч при температурах 800–900 °С, относительной деформации 20–90 % в интервале скоростей деформации 1–100 с⁻¹. Погрешность определения сопротивления металла деформации при использовании разработанной регрессионной модели не превышает 5 % по сравнению с экспериментальными данными.

Для низьколегованої сталі, яка використовується у колісному виробництві, встановлені закономірності пластичного формозмінення в умовах гарячої деформації. Отримана регресійна модель розрахунку опору деформації сталі 10ХФБТч при температурах 800–900 °С, відносній деформації 20–90 % в інтервалі швидкостей деформації 1–100 с⁻¹. Похибка визначення опору металу деформації при використанні розробленої регресійної моделі не перевищує 5 % порівняно з експериментальними даними.

For low-alloy steel the applied in the wheeled production is set conformities to law of plastic flowage in the conditions of hot deformation. The regressive model of calculation of resistance of deformation is got 10ХФБТч became at the temperatures of 800–900 °С, to relative deformation 20–90 % in the interval of speeds of deformation of 1–100 s⁻¹. The error in determining resistance of the metal deformation using a regression model developed does not exceed 5 %, compared with the experimental data.

Шейко С. П.

докторант, канд. техн. наук, доц. ЗНТУ,
sheyko.s@mail.ru

ЗНТУ – Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье.

УДК 621.923

Шейко С. П.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ДЕФОРМАЦИИ НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ ДЛЯ КОЛЕСНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Для разработки технологий обработки новых сплавов и совершенствования действующих технологий их обработке необходимо знать сопротивление деформации, пластичность металлов и их сплавов. Сопротивление деформации металлов σ_s является одной из основных характеристик их технологической деформируемости.

Согласно теории А. Надаи, сопротивление металлов деформации σ_s описывается уравнением:

$$d\sigma = \frac{\partial \sigma_m}{\partial T} dT + \frac{\partial \sigma_m}{\partial \varepsilon} d\varepsilon + \frac{\partial \sigma_m}{\partial \tau} d\tau + \frac{\partial \sigma_m}{\partial u} du, \quad (1)$$

где σ_m – предел текучести; T – температура; ε – относительная деформация; τ – время деформации; u – скорость деформации.

Слагаемые уравнения (1) учитывают влияние на сопротивление деформации температуры, относительной деформации, разупрочнения во времени, изменения напряжений в зависимости от скорости деформации с учетом вязкости металла.

До настоящего времени закономерности, необходимые для решения уравнения (1), недостаточно изучены. Поэтому на практике для определения σ_s используют экспериментальные данные в виде конкретных дискретных значений для определенных условий деформирования и марок стали или зависимости, аппроксимирующие экспериментальные данные [1].

Одним из эффективных способов исследования сопротивления деформации 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 сопротивления деформации сталей нередко противоречивы [2] и не всегда позволяют однозначно судить о влиянии того или иного фактора. Поэтому разработка регрессионных математических моделей определяющих сопротивление металлов деформации для конкретных марок сталей при обработке экспериментальных данных пластометров является актуальной задачей в обработке металлов давлением.

Целью работы является установление закономерностей изменения сопротивления металла деформации от температурно-деформационных факторов обработки на примере низколегированной стали 10ХФБТч применяемой в колесном производстве.

Методика проведения эксперимента. Анализ влияния температуры, скорости деформации и степени деформации на сопротивление металла деформации изучали с использованием статистического метода планирования активного эксперимента. В качестве функции отклика принимали сопротивление металла деформации (σ_s). Математическую обработку экспериментальных данных с целью построения математической модели влияния химического состава на свойства стали проводили по методикам [3] с применением регрессионного анализа. Для сокращения числа опытов и предполагая, нелинейный характер функций отклика в работе использовали симметричный композиционный план второго порядка. Матрица выбранного плана приведена в табл. 1.

В результате обработки экспериментальных данных методом регрессионного анализа было получено уравнение вида:

$$Y = b_0 + \sum_{1 \leq i \leq k} b_i x_i + \sum_{1 \leq i < j \leq k} b_{ij} x_i x_j + \sum_{1 \leq i \leq k} b_{ii} x_i^2. \quad (2)$$

Коэффициенты модели (2) рассчитывали по следующей формуле:

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^N x_{iu} y_u}{N}, \quad i = 0, 1, 2, \dots, k. \quad (3)$$

Оценка значимости коэффициента регрессии проводилась при помощи критерия Стьюдента, исходя из соотношения:

$$|b_i| \geq b_{\text{сд}} = t(0,05; f_y) \frac{S_y}{\sqrt{n}}, \quad (4)$$

где $t(0,05; f_y)$ – 5 %-ная точка распределения Стьюдента с $f_y = n - 1$ степенями свободы; n – количество дублей.

Таблица 1

Симметричный композиционный план второго порядка

N	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1^2	x_2^2	x_3^2	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$
1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
2	+	+	+	–	+	+	+	+	–	–
3	+	+	–	+	+	+	+	–	+	–
4	+	+	–	–	+	+	+	–	–	+
5	+	–	+	+	+	+	+	–	–	+
6	+	–	+	–	+	+	+	–	+	–
7	+	–	–	+	+	+	+	+	–	–
8	+	–	–	–	+	+	+	+	+	+
9	+	–	0	0	+	0	0	0	0	0
10	+	–	0	0	+	0	0	0	0	0
11	+	0	+	0	0	+	0	0	0	0
12	+	0	–	0	0	+	0	0	0	0
13	+	0	0	+	0	0	+	0	0	0
14	+	0	0	–	0	0	+	0	0	0
15	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Адекватность модели определялась из соотношения:

$$F = \frac{S_{\text{сд}}^2}{S_y^2} \leq F(0,05; f_{\text{сд}}; f_y), \quad (5)$$

$$S_{\text{сд}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\bar{y} - y_i)^2}{N - k - 1}, \quad (6)$$

где y – расчетное значение отклика в опыте; \bar{y} – фактическое значение отклика в опыте; S_y – средняя дисперсия ошибки; $f_{\text{сд}}$ – число степеней свободы дисперсии адекватности; k – количество статистически значимых коэффициентов регрессии.

Основная часть исследования. В качестве независимых переменных были выбраны: температура деформации (X_1), скорость деформации (X_2), степень деформации (X_3). В процессе поиска оптимального состава сплава 10ХФБТч по изобретению [4], в индукционной печи с основной футеровкой емкостью 50 кг было проведены лабораторные плавки стали.

Матрица планирования экспериментов представлена в табл. 1. Расчетные уровни интервалов варьирования, характер их изменений и схемы кодирования представлены в табл. 2. Выбор основного уровня и интервалов варьирования проводился исходя из того,

что обработка давлением на прессах и ковочных машинах ведется при средней скорости движения рабочего органа машины в пределах примерно 0,1–0,5 м/с. При обработке на молоте воздействие на металл носит уже динамический характер; скорость бабы молота в момент удара составляет 5–10 м/с, а весь процесс деформации за один удар длится лишь сотые доли секунд. Еще более высокие скорости деформирования возникают при штамповке на высоко-скоростных молотах (~20–30 м/с и выше). Поэтому важно знать, как влияет скорость деформации на сопротивление деформации в широком интервале 1–100 с⁻¹.

При обработке давлением с увеличением степени деформации повышаются все показатели прочности, в том числе и сопротивление деформации. Увеличение σ_s особенно интенсивно происходит на начальных стадиях деформации, при дальнейшем повышении степени деформации интенсивность упрочнения снижается. Поэтому интервал варьирования степени деформации составляет 0,2–0,9.

Таблица 2

Исследуемые факторы

Характеристика	Факторы		
	Температура (Т), °С	Скорость деформации (u), с ⁻¹	Степень деформации (ε)
Код	X ₁	X ₂	X ₃
Основной уровень	850	50	0,55
Интервал варьирования	50	49	0,35
Нижний уровень	800	1	0,2
Верхний уровень	900	99	0,9

Численные значения коэффициентов регрессии и их значимость, определенные с учетом различия дисперсий для каждой функции отклика, а также проверка значимости по критерию Стьюдента и оценка адекватности модели по критерию Фишера представлены в табл. 3.

В результаты регрессивного анализа, были получены уравнения, показывающие зависимость сопротивление металла деформации от условий пластической деформации.

В результате расчетов были получены следующие уравнения:

$$Y = 263,44 + 22,8 X_1 + 64 X_2 + 13,7 X_3 - 29,56 X_1^2 + 17,4 X_2^2 + 7,94 X_3^2 + 0,5 X_1 X_2 + 2 X_1 X_3 + 0,75 X_2 X_3 \quad (7)$$

Таблица 3

Проверка результатов регрессивного анализа на значимость и адекватность

Параметр	Функции отклика
	Y ₁
Δb	7,68
t-критерий	2,78
F-критерий	6,09 > 5,92

Коэффициенты, абсолютная величина которых равна доверительному интервалу Δb или больше его, следует признать статистически значимыми. Статистически незначимые коэффициенты (в данном случае b₇, b₈, b₉) из модели можно исключить.

Проверка адекватности моделей показывает, что их можно использовать для прогнозирования значений функций отклика при любых значениях факторов, находящихся между верхним и нижним уровнями. Для этого целесообразно перейти к натуральным переменным, используя формулу перевода, представленную в следующем виде:

$$X_{ij}^k = \frac{X_{ij}^n - X_{ij}^o}{\Delta_i} \quad (8)$$

где X_{ij}^k – кодированное значение изучаемого i -го фактора в j -ом уравнении; X_{ij}^n – натуральное значение изучаемого i -го фактора в j -ом уравнении; X_{ij}^o – значение изучаемого i -го фактора в j -ом уравнении на основном уровне; Δ_i – значение интервала варьирования изучаемого i -го фактора.

Путем замены в уравнения (7) переменных X_i на правую часть уравнения (8) и последующим приведением подобных получаем натуральные уравнения, описывающие влияния параметров деформации на сопротивление металла деформации:

$$\sigma_s = -8715 + 20,56T + 0,58u + 32,20\varepsilon - 0,01182T^2 + 0,007u^2 + 64,85\varepsilon^2 \quad (9)$$

Для оценки адекватности уравнений был проведен расчет по полученным уравнениям регрессии для основного уровня химического состава стали. Результаты расчетов были сопоставлены с экспериментальными исследованиями. Как видно из табл. 4 погрешность между расчетными и экспериментальными значениями функции отклика не превышает 5 %.

Таблица 4

Сравнение расчетных и экспериментальных данных

Показатель	Расчетное значение	Экспериментальное	Погрешность, %
σ_s	304,88	291	4,8

С целью определения сопротивления металла деформации строили трехмерные графические зависимости (рис. 1–2).

При повышении температуры увеличивается амплитуда тепловых колебаний атомов, все прочностные характеристики, в том числе и сопротивление деформации, понижаются. Каждый сплав имеет свои особенности, нарушающие в некоторых узких температурных интервалах монотонный характер изменения сопротивления деформации от температуры. Такая картина наблюдается в том случае, если при повышении температуры в сплаве происходят физико-химические процессы, что может привести к повышению σ_s в интервале температур протекания этих процессов.

Соотношение температур подчиняется условию $T_1 < T_2 < T_3$, т. е. верхняя кривая соответствует минимальному значению T . По графику (рис. 1) видно, что с увеличением температуры уменьшается степень деформации, при которой начинается разупрочнение.

На основе экспериментов было установлено, что в рассматриваемом интервале температур, изменение σ_s с изменением T подчиняется экспоненциальной зависимости.

Соотношение скоростей деформации подчиняется условию $u_1 > u_2 > u_3$, при этом степень деформации, при которой происходит разупрочнение, почти не зависит от скорости деформации. Учет влияния степени и скорости деформации на σ_s осложняется тем, что с увеличением степени деформации снижается температура разупрочняющих процессов, повышаются выход тепла и температура деформируемого тела. В свою очередь, увеличение скорости деформации способствует повышению температуры, снижая потери тепла в окружающую среду. Таким образом, увеличение скорости и степени деформации прямо повышают сопротивление деформации, а косвенно, наоборот, снижают его.

При горячей обработке, когда выход тепла невелик, упрочняющее действие обоих факторов преобладает, и сопротивление деформации повышается с увеличением степени и скорости деформации.

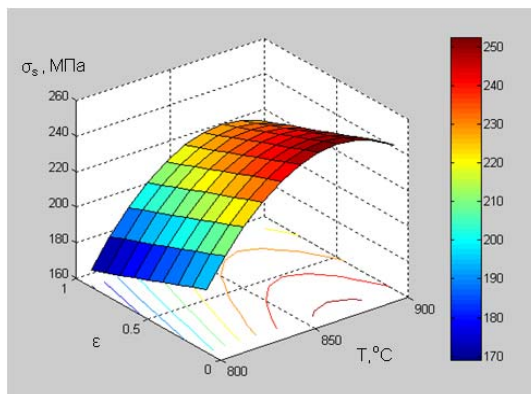


Рис. 1. Влияние температуры и степени деформации на характер зависимости сопротивления деформации

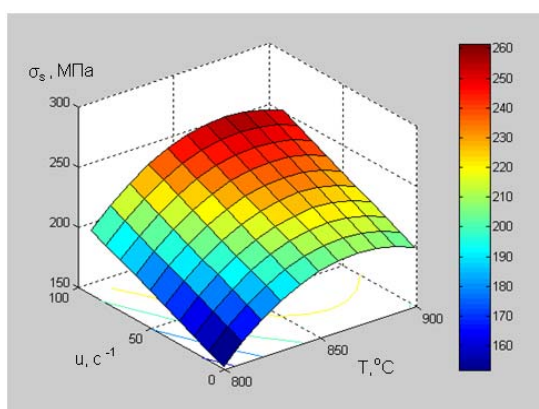


Рис. 2. Влияние температуры и скорости деформации на характер зависимости сопротивления деформации

Почти у всех цветных металлов и сплавов сопротивление деформации в области малых степеней деформации растет с увеличением ϵ . При одинаковой скорости упрочнения и разупрочнения сопротивление деформации не зависит от степени деформации. Иногда величина σ_s при больших степенях деформации может быть меньше, чем исходная при одинаковых прочих условиях деформации. Степень деформации, при которой происходит разупрочнение, почти не зависит от скорости деформации. При увеличении температуры деформации она уменьшается.

ВЫВОДЫ

1. Установлены закономерности пластического формоизменения новой марки стали 10ХФБТч в условиях горячего деформирования.
2. Погрешность определения сопротивления металла деформации при использовании разработанной регрессионной модели не превышает 5 % по сравнению с экспериментальными данными.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соколов Л. Д. *Сопротивление металлов пластической деформации* / Л. Д. Соколов. – М. : *Металлургиздат*, 1963. – 284 с.
2. Полухин П. И. *Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов: справочник* / П. И. Полухин, Г. Я. Гун, А. М. Галкин. – М. : *Металлургия*, 1983. – 352 с.
2. Новик Ф. С. *Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов* / Ф. С. Новик, Я. Б. Арсов. – М. : *Машиностроение; София : Техника*, 1980. – 304 с.
3. Пат. № 105341, *України, МПК С22С 38/28(2006.01), Низьколегована сталь* / Міщенко В. Г., Беліков С. Б., та ін, опубл. 25.04.2014, бюл. № 8.

Статья поступила в редакцию 15.04.2014 г.