

Яковченко А. В., Денищенко П. Н., *Кравцова С. И.
Донбасский государственный технический университет
*E-mail: kravtsovasvetlaya@yandex.ru

АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСЧЕТА НАПРЯЖЕНИЯ ТЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛА В ПРОЦЕССАХ ГОРЯЧЕЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ЗНАЧЕНИЯХ СТЕПЕНИ ДЕФОРМАЦИИ В ДИАПАЗОНЕ 0,05–0,5

Выполнен анализ точности методов Л. В. Андреюка и др., В. А. Николаева, В. И. Зюзина, В. С. Солода и др. расчета напряжения течения металла в процессах горячей пластической деформации при значениях степени деформации в диапазоне 0,05–0,5 по отношению к экспериментальным данным. Сравнительный анализ расчетных и экспериментальных данных для одних и тех же условий выполнен с учетом научно обоснованного выбора наиболее рациональных точек в области изменения значений факторов степени деформации, скорости деформации и температуры металла путем реализации планируемого эксперимента. Соответствующие экспериментальные значения напряжения течения металла определялись методом компьютерной сплайн-интерполяции экспериментальной информации.

Ключевые слова: напряжение течения металла, горячая пластическая деформация, степень деформации, скорость деформации, температура металла, планируемый эксперимент, сплайн-интерполяция экспериментальной информации.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Напряжение течения металла является важной составляющей по влиянию на результаты расчетов напряженно-деформированного состояния металла и энергосиловых параметров в процессах обработки металлов давлением. Основой при его определении является экспериментальная информация, которую получают на специальных испытательных машинах. В технической литературе, например [1 и др.], эта информация представлена виде кривых течения металла. Актуальность анализа известных методов расчета напряжения течения металла в процессах горячей пластической деформации при изменении значений степени деформации от 0,05 до 0,5 заключается в том, что методы [2–5] разработаны на базе экспериментальной информации, полученной в основном в указанном диапазоне. Сравнительный анализ расчетных и экспериментальных данных для одних и тех же условий, подготовленных на основе теории планируемого эксперимента и метода сплайн-интерполяции экспериментальной информации, а также компьютер-

ных программ [6], позволит судить о точности известных методов.

Постановка задачи. В работе поставлена задача выполнить анализ точности методов [2–5, 7] расчета напряжения течения металла в процессах горячей пластической деформации при значениях степени деформации в диапазоне 0,05–0,5 по отношению к экспериментальным данным.

Изложение материала. Результаты расчетов по методам Л. В. Андреюка и др. [2], В. А. Николаева [3], В. И. Зюзина [4], В. С. Солода и др. [5] и методу [7], предусматривающему расчет уточненных констант при определении термокинетических параметров в формуле расчета напряжения течения металла, представлены на рисунках 1–7 в окнах компьютерных программ. Расчеты напряжения течения металла осуществлялись в зависимости от степени деформации ϵ , скорости деформации U и температуры T . На всех рисунках линией 2 показаны экспериментальные кривые, а линией 1 — расчетные.

Анализ напряженно-деформированного состояния металла в процессах обработки

МЕТАЛЛУРГИЯ

металлов давлением в основном выполняются на базе конечно-элементного моделирования. При этом в конкретных точках очага деформации могут встречаться различные сочетания значений факторов ϵ , U , T . Научно обоснованный выбор наиболее рациональных точек в области изменения факторов ϵ ,

U , T выполнялся на основе реализации планируемого эксперимента. Соответствующие экспериментальные значения напряжения течения металла σ определялись путем компьютерной сплайн-интерполяции экспериментальной информации по методу, предложенному в работе [6].

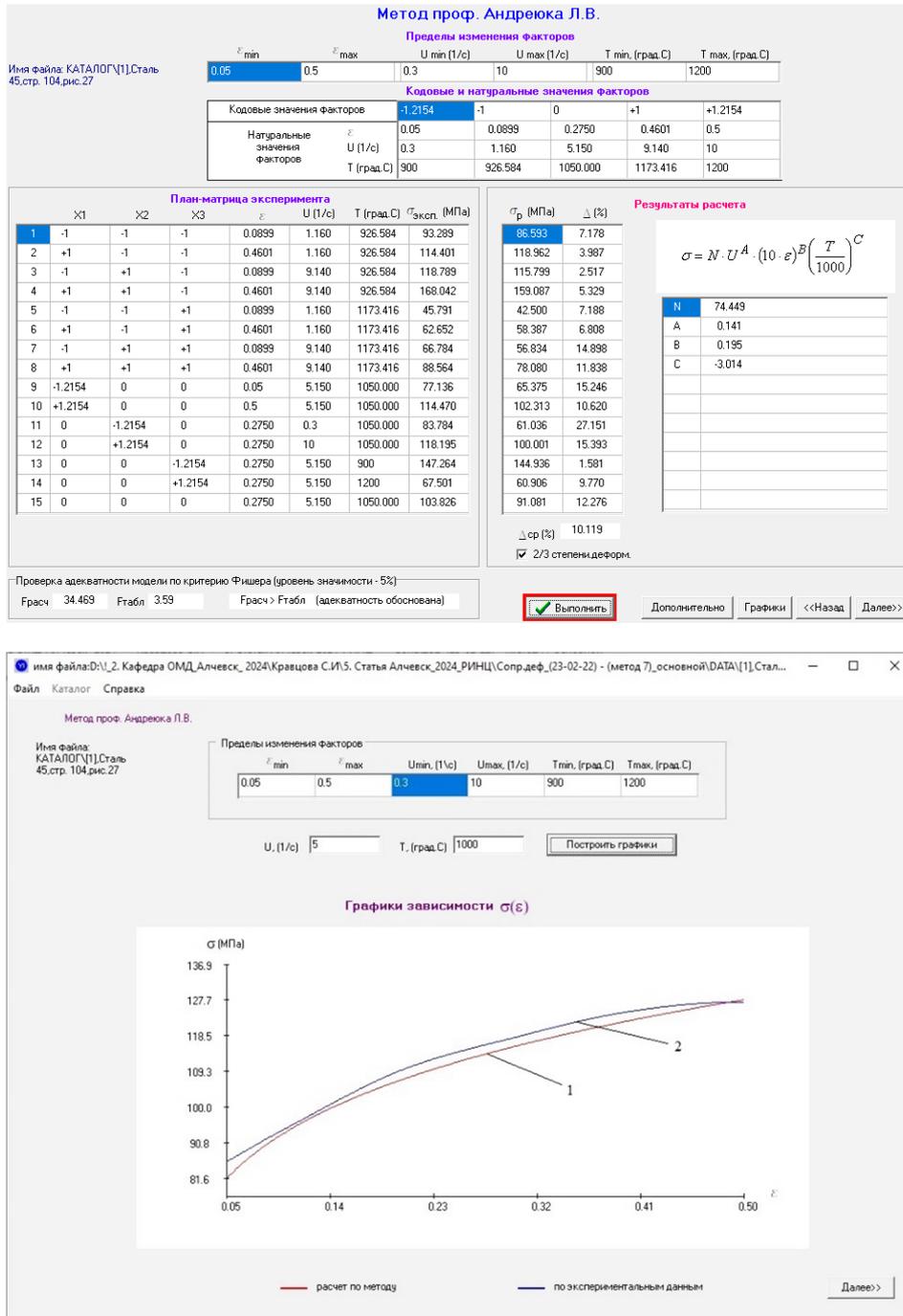


Рисунок 1 — Результаты анализа метода Л. В. Андреюка и др. [2]

МЕТАЛЛУРГИЯ

Метод проф. Николаева В.А.

Имя файла: КАТАЛОГ\1\Сталь 45,стр. 104,рис.27

Пределы изменения факторов

ε_{min}	ε_{max}	U min (1/c)	U max (1/c)	T min, (град.С)	T max, (град.С)
0.05	0.5	0.3	10	900	1200

Кодовые и натуральные значения факторов

Кодовые значения факторов	-1.2154	-1	0	+1	+1.2154
Натуральные значения факторов	ε	U (1/c)	T (град.С)		
	0.05	0.3	900		
	0.0899	1.160	1050.000		
	0.2750	5.150	1173.416		
	0.4601	9.140	1200		
	0.5	10			

Группа стали - 1
Углеродистые и инструментальные стали
0.8кп; 08ю; 20; Ст. 3; 45; Ст. 6; У8 и др.

Группа стали - 2
Легированные и низколегированные стали

Укажите группу стали (1-7)

План-матрица эксперимента

	X1	X2	X3	ε	U (1/c)	T (град.С)	$\sigma_{эксп.}$ (МПа)
1	-1	-1	-1	0.0899	1.160	926.584	93.289
2	+1	-1	-1	0.4601	1.160	926.584	114.401
3	-1	+1	-1	0.0899	9.140	926.584	118.789
4	+1	+1	-1	0.4601	9.140	926.584	168.042
5	-1	-1	+1	0.0899	1.160	1173.416	45.791
6	+1	-1	+1	0.4601	1.160	1173.416	62.652
7	-1	+1	+1	0.0899	9.140	1173.416	66.784
8	+1	+1	+1	0.4601	9.140	1173.416	88.564
9	-1.2154	0	0	0.05	5.150	1050.000	77.136
10	+1.2154	0	0	0.5	5.150	1050.000	114.470
11	0	-1.2154	0	0.2750	0.3	1050.000	83.784
12	0	+1.2154	0	0.2750	10	1050.000	118.195
13	0	0	-1.2154	0.2750	5.150	900	147.264
14	0	0	+1.2154	0.2750	5.150	1200	67.501
15	0	0	0	0.2750	5.150	1050.000	103.826

Проверка адекватности модели по критерию Фишера (уровень значимости - 5%)
Грассч 17.802 Фгабл 3.59 Грассч > Фгабл (адекватность обоснована)

Результаты расчета

σ_r (МПа)	Δ (%)	K_T	K_ε	K_U
87.041	6.697	1.168	0.996	0.845
124.546	8.868	1.168	1.426	0.845
100.868	15.086	1.168	0.996	0.979
144.331	14.110	1.168	1.426	0.979
45.570	0.484	0.612	0.996	0.845
65.205	4.074	0.612	1.426	0.845
52.808	20.927	0.612	0.996	0.979
75.563	14.680	0.612	1.426	0.979
65.935	14.522			
103.498	9.585			
63.338	24.404			
102.365	13.393			
133.956	9.037			
60.341	10.607			
93.572	9.876			

$\Delta_{ср} (\%)$ 11.757

$\sigma = \sigma_0 \cdot K_T \cdot K_\varepsilon \cdot K_U$

$\sigma_0 = 80 + 25 \cdot \left\{ 1 - \left[\frac{5 - N_1}{4.5} \right]^{1.8} \right\}$

N_1 1.430 σ_0 88.520

Имя файла: D:\1_2. Кафедра ОМД_Алчевск_2024\Кравцова С.И\5. Статья Алчевск_2024_РИНЦ\Сопр.деф_(23-02-22) - (метод 7)_основной\DATA\1\Сталь...

Метод проф. Николаева В.А.

Имя файла: КАТАЛОГ\1\Сталь 45,стр. 104,рис.27

Пределы изменения факторов

ε_{min}	ε_{max}	U min, (1/c)	U max, (1/c)	T min, (град.С)	T max, (град.С)
0.05	0.5	0.3	10	900	1200

U, (1/c) T, (град.С)

Графики зависимости $\sigma(\varepsilon)$

— расчет по методу — по экспериментальным данным

Рисунок 2 — Результаты анализа метода В. А. Николаева [3]

Авторы работы [2] предложили формулу (1). Напряжение течения металла определяется в зависимости от степени, скорости деформации и температуры:

$$\sigma = S \cdot \sigma_0 \cdot U^A (10\varepsilon)^B (T/1000)^C, \quad (1)$$

где S, A, B, C — константы, определяемые для каждой марки стали на основе экспериментальной пластометрической информации;

σ_0 — базисное значение напряжения течения металла при постоянных значениях термомеханических факторов ($\varepsilon=0,1, U=10 \text{ с}^{-1}, T=1000 \text{ }^\circ\text{C}$).

Химический состав материала учитывается через коэффициенты S, A, B, C .

Результаты анализа метода Л. В. Андreyока и др. для стали 45 [1] представлены на рисунке 1. Средняя относительная погрешность расчетных значений по отношению к экспериментальным равна 10 %, при отдельных сочетаниях факторов ε, U, T она достигает 27 %.

Анализ метода [2] при изменении значений степени деформации от 0,05 до 0,5, выполненный для 25 марок конструкционных, инструментальных и нержавеющей сталей, показал, что средняя относительная погрешность составила 21 % (максимальная относительная погрешность для отдельных марок сталей равна 50 %).

Путем обработки экспериментальной информации разработан метод В. А. Николаева [3] расчета напряжения течения металла для семи групп сталей. Полученная формула (2) имеет следующий вид:

$$\sigma = \sigma_0 k_\varepsilon k_U k_T, \quad (2)$$

где k_ε, k_U, k_T — поправочные коэффициенты, учитывающие влияние степени деформации, скорости деформации и температуры.

Результаты анализа метода В. А. Николаева для стали 45 [1] представлены на рисунке 2. Средняя относительная погрешность расчетных значений по отношению к экспериментальным равна 11 %, при отдельных сочетаниях факторов она достигает 24 %.

Анализ метода [3] при изменении значений степени деформации от 0,05 до 0,5,

выполненный для 25 марок конструкционных, инструментальных и нержавеющей сталей, показал, что средняя относительная погрешность составила 15 % (максимальная относительная погрешность для отдельных марок сталей равна 35 %).

Метод расчета напряжения течения металла (метод термомеханических коэффициентов), разработанный В. И. Зюзиным [4], позволяет расчленить многозначную функциональную зависимость $\sigma=f(\varepsilon, U, T)$ на ряд зависимостей между тремя переменными (термомеханическими коэффициентами) k_ε, k_U и k_T :

$$k_\varepsilon = A_1 \varepsilon^{n_1}; k_U = A_2 U^{n_2}; k_T = A_3 e^{-n_3 T}, \quad (3)$$

где $A_1, A_2, A_3, n_1, n_2, n_3$ — константы, зависящие от материала.

После подстановки функций (3) в формулу (2) с учетом константы $A = \sigma_0 A_1 A_2 A_3$ получена широко известная формула для расчета напряжения течения металла, предложенная в методе В. И. Зюзина:

$$\sigma = \frac{A \varepsilon^{n_1} U^{n_2}}{e^{n_3 T}}. \quad (4)$$

Результаты анализа метода В. И. Зюзина [4] для стали 45 [1] представлены на рисунке 3. Средняя относительная погрешность расчетных значений по отношению к экспериментальным равна 5 %, при отдельных сочетаниях факторов она достигает 15 %.

Анализ метода [4] при изменении значений степени деформации от 0,05 до 0,5, выполненный для 25 марок конструкционных, инструментальных и нержавеющей сталей, показал, что средняя относительная погрешность составила 5 % (максимальная относительная погрешность для отдельных марок сталей равна 15 %).

В методах [2] и [3] формулы и, соответственно, входящие в них константы используются для групп марок сталей. В методе [4] константы определяются для одной конкретной марки стали. Этим можно объяснить их более высокую точность.

МЕТАЛЛУРГИЯ

Аппроксимация экспериментальной информации на основе формулы проф. Зюзина В.И.

Имя файла: КАТАЛОГ\1\Сталь 45, стр. 104, рис.27

Пределы изменения факторов						
ε_{\min}	ε_{\max}	U min (1/c)	U max (1/c)	T min, (град.С)	T max, (град.С)	
0.05	0.5	0.3	10	900	1200	

Кодовые и натуральные значения факторов						
Кодовые значения факторов	ε	U (1/c)	T (град.С)	$\sigma_{\text{эксп}}$ (МПа)		
-1.2154	0.05	0.3	900	93.289		
-1	0.0899	1.160	926.584	118.789		
0	0.2750	5.150	1050.000	147.264		
+1	0.4601	9.140	1173.416	173.416		
+1.2154	0.5	10	1200	188.826		

План-матрица эксперимента							
	X1	X2	X3	ε	U (1/c)	T (град.С)	$\sigma_{\text{эксп}}$ (МПа)
1	-1	-1	-1	0.0899	1.160	926.584	93.289
2	+1	-1	-1	0.4601	1.160	926.584	114.401
3	-1	+1	-1	0.0899	9.140	926.584	118.789
4	+1	+1	-1	0.4601	9.140	926.584	168.042
5	-1	-1	+1	0.0899	1.160	1173.416	45.791
6	+1	-1	+1	0.4601	1.160	1173.416	62.652
7	-1	+1	+1	0.0899	9.140	1173.416	66.784
8	+1	+1	+1	0.4601	9.140	1173.416	88.564
9	-1.2154	0	0	0.05	5.150	1050.000	77.136
10	+1.2154	0	0	0.5	5.150	1050.000	114.470
11	0	-1.2154	0	0.2750	0.3	1050.000	83.784
12	0	+1.2154	0	0.2750	10	1050.000	118.195
13	0	0	-1.2154	0.2750	5.150	900	147.264
14	0	0	+1.2154	0.2750	5.150	1200	67.501
15	0	0	0	0.2750	5.150	1050.000	103.826

Результаты расчета	
σ_p (МПа)	Δ (%)
94.917	1.745
127.640	11.573
122.649	3.249
164.933	1.850
50.309	9.867
67.654	7.984
65.008	2.659
87.420	1.291
74.758	3.083
113.521	0.829
71.558	14.592
110.601	6.425
149.801	1.722
69.252	2.594
101.853	1.900

$$\sigma = \frac{A \cdot \varepsilon^{n1} \cdot U^{n2}}{e^{n3} \cdot T}$$

A	1682.792987366253780
n1	0.181420841643450
n2	0.124173842902655
n3	0.002571838867067

Δ ср (%) 4.758

Мак. число итераций: 300, Выполнено: 8

Проверка адекватности модели по критерию Фишера (уровень значимости - 5%)
 Грасс 118.796 Fтабл 3.59 Грасс > Fтабл (адекватность обоснована)

Имя файла: D:\2. Кафедра ОМД_Алчевск_2024\Кравцова С.И\5. Статья Алчевск_2024_РИНЦ\Сопр.деф.(23-02-22) - (метод 7)_основной\DATA\1\Стал...

Аппроксимация экспериментальной информации на основе формулы проф. Зюзина В.И.

Имя файла: КАТАЛОГ\1\Сталь 45, стр. 104, рис.27

Пределы изменения факторов						
ε_{\min}	ε_{\max}	U min, (1/c)	U max, (1/c)	T min, (град.С)	T max, (град.С)	
0.05	0.5	0.3	10	900	1200	

U, (1/c) 5 T, (град.С) 1000

Графики зависимости $\sigma(\varepsilon)$

— расчет по методу — по экспериментальным данным

Рисунок 3 — Результаты анализа метода В.И. Зюзина [4]

В методе В. С. Солода и др. [5] формула преобразования структуры металла при для расчета напряжения течения металла σ , его горячей пластической деформации, учитывающая процессы динамического имеет вид

$$\sigma = \sigma_y + (\sigma_p - \sigma_y) \times \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_p}{\varepsilon_x} + 1 \right) \cdot \exp\left(\frac{\varepsilon_p - \varepsilon}{\varepsilon_x} \right), \quad (5)$$

где σ_y , σ_p , ε_p и ε_x — термокинетические параметры: σ_p — пиковое значение напряжения σ на кривой течения, соответствует пиковой деформации ε_p ; σ_y — установившееся напряжение, при котором наступает равновесие процессов упрочнения и динамической рекристаллизации при достижении деформации ε_x ; ε — накопленная степень деформации в точке очага деформации.

Термокинетические параметры, определяющие кривые течения сталей, выражаются следующими зависимостями:

$$\sigma_p = n_1 \cdot \left(\frac{Z}{A} \right)^{m_1}; \quad \sigma_y = n_2 \cdot \left(\frac{Z}{A} \right)^{m_2}; \quad (6)$$

$$\varepsilon_x = n_3 \cdot \left(\frac{Z}{A} \right)^{n_3}; \quad \varepsilon_p = n_4 \cdot \left(\frac{Z}{A} \right)^{m_4},$$

а входящие в них константы, найденные в работе [5], равны

$$n_1 = 72,06, \quad m_1 = 0,131,$$

$$n_2 = 51,66, \quad m_2 = 0,149,$$

$$n_3 = 0,193, \quad m_3 = 0,112,$$

$$n_4 = 0,268, \quad m_4 = 0,107.$$

Влияние химического состава стали отражается величиной энергии активации деформации Q (кДж·моль⁻¹), которая входит в комплексный температурно-скоростной параметр процесса деформации (параметр Зинера — Холломона (Zener — Hollomon) Z), A — скоростная константа деформируемого материала [5]:

$$Z = U \cdot \exp\left[\frac{Q}{R \cdot T} \right],$$

$$A = 0,146 \cdot \exp\left(9,1 \cdot 10^{-5} \cdot Q \right),$$

где $R = 8,318$ Дж·моль⁻¹·К⁻¹ — газовая постоянная; T — абсолютная температура.

Результаты анализа метода В. С. Солода и др. [5] для стали 45 [1] представлены на рисунке 4.

Средняя относительная погрешность расчетных значений по отношению к экспериментальным равна 8 %, при отдельных сочетаниях факторов она достигает 28 %.

Авторы метода [5] установили, что погрешность расчета, выраженная среднеквадратичным отклонением, составляет 6 %. Вместе с тем заявлен достаточно широкий диапазон изменения ряда химических элементов, соответственно, вопрос точности формулы [5] требует более подробного рассмотрения.

В работе [7] разработаны математическая модель, метод и компьютерная программа расчёта уточненных констант, определяющих термокинетические параметры в формулах (6) расчета напряжения течения металла с учетом процессов динамического преобразования его структуры при горячей пластической деформации.

Результаты анализа метода [5] и учета при этом метода [7] для стали 0,06С–0,12Si–0,42Mn представлены на рисунках 5–7 (при изменении значений степени деформации от 0,05 до 0,5). (Степень деформации 0,5 соответствует степени логарифмической деформации, равной 0,693, которая в этих методах используется). На рисунке 7 линией 2 показаны экспериментальные кривые, линией 3 — кривые по методу [5], линией 1 — кривые с учетом метода [7]. Анализ показал, что средняя относительная погрешность по методу [5] составила 27 %, а с учетом метода [7] — 10 % (рис. 5). На рисунке 6 показано, что учет метода [7] дает среднюю относительную погрешность расчетных значений по отношению к экспериментальным, равную 9 %, при отдельных сочетаниях факторов она достигает 18 %.

Кривые на рисунке 7 также показывают существенное повышение точности расчетов на базе уточненных констант, определяющих термокинетические параметры в формуле расчета напряжения течения металла по методу [7].

МЕТАЛЛУРГИЯ

Метод моделирования напряжения течения углеродистых, низколегированных и микролегированных сталей с учетом процессов динамического преобразования структуры

Имя файла: КАТАЛОГ\1\Сталь 45,стр. 104,рис.27

Пределы изменения факторов

ϵ_{min}	ϵ_{max}	U min (1/c)	U max (1/c)	T min, (град.С)	T max, (град.С)
0.051	0.693	0.3	10	900	1200

Химический состав (%)

C (0.05 - 1.1)	0.43
Si (0 - 1.65)	0.26
Mn (0.03 - 1.55)	0.74
Cr (0 - 0.3)	
Ni (0 - 0.3)	
P (0 - 0.05)	0.022
S (0 - 0.05)	0.016
V (0 - 0.26)	
Cu (0 - 0.28)	

Кодовые и натуральные значения факторов

Кодовые значения факторов	-1.2154	-1	0	+1	+1.2154
ϵ	0.051	0.1079	0.3720	0.6361	0.693
U (1/c)	0.3	1.160	5.150	9.140	10
T (град.С)	900	926.584	1050.000	1173.416	1200

План-матрица эксперимента

	X1	X2	X3	ϵ	U (1/c)	T (град.С)	$\sigma_{эксп.}$ (МПа)
1	-1	-1	-1	0.1079	1.160	926.584	95.618
2	+1	-1	-1	0.6361	1.160	926.584	113.947
3	-1	+1	-1	0.1079	9.140	926.584	122.095
4	+1	+1	-1	0.6361	9.140	926.584	167.887
5	-1	-1	+1	0.1079	1.160	1173.416	47.116
6	+1	-1	+1	0.6361	1.160	1173.416	62.598
7	-1	+1	+1	0.1079	9.140	1173.416	69.034
8	+1	+1	+1	0.6361	9.140	1173.416	88.441
9	-1.2154	0	0	0.051	5.150	1050.000	77.136
10	+1.2154	0	0	0.693	5.150	1050.000	114.470
11	0	-1.2154	0	0.3720	0.3	1050.000	84.372
12	0	+1.2154	0	0.3720	10	1050.000	120.466
13	0	0	-1.2154	0.3720	5.150	900	150.464
14	0	0	+1.2154	0.3720	5.150	1200	68.725
15	0	0	0	0.3720	5.150	1050.000	106.158

Результаты расчета

$$\sigma = \sigma_y + (\sigma_p - \sigma_y) \cdot \left(\frac{\epsilon - \epsilon_p}{\epsilon_x} + 1 \right) \cdot \exp\left(\frac{\epsilon_p - \epsilon}{\epsilon_x} \right)$$

σ (МПа)	Δ (%)
99.122	2.619
124.127	8.934
128.251	5.042
167.070	0.486
60.169	27.705
61.380	1.946
75.238	8.987
87.149	1.461
70.932	8.043
106.761	6.734
77.515	8.127
124.449	3.306
164.317	9.207
83.453	21.431

Δ_{cp} (%) 8.118

Q = 251988.163
A = 1327779935.374

Q по формуле В.С. Солода и др.
 Q по формуле S.F. Medina и др.
 Q по объединенной формуле
 Усовершенствованный метод

Проверка адекватности модели по критерию Фишера (уровень значимости - 5%)
Грассч 59.635 Гтабл 3.59 Грассч > Гтабл (адекватность обоснована)

Выполнить Дополнительно Графики <<Назад Далее>>

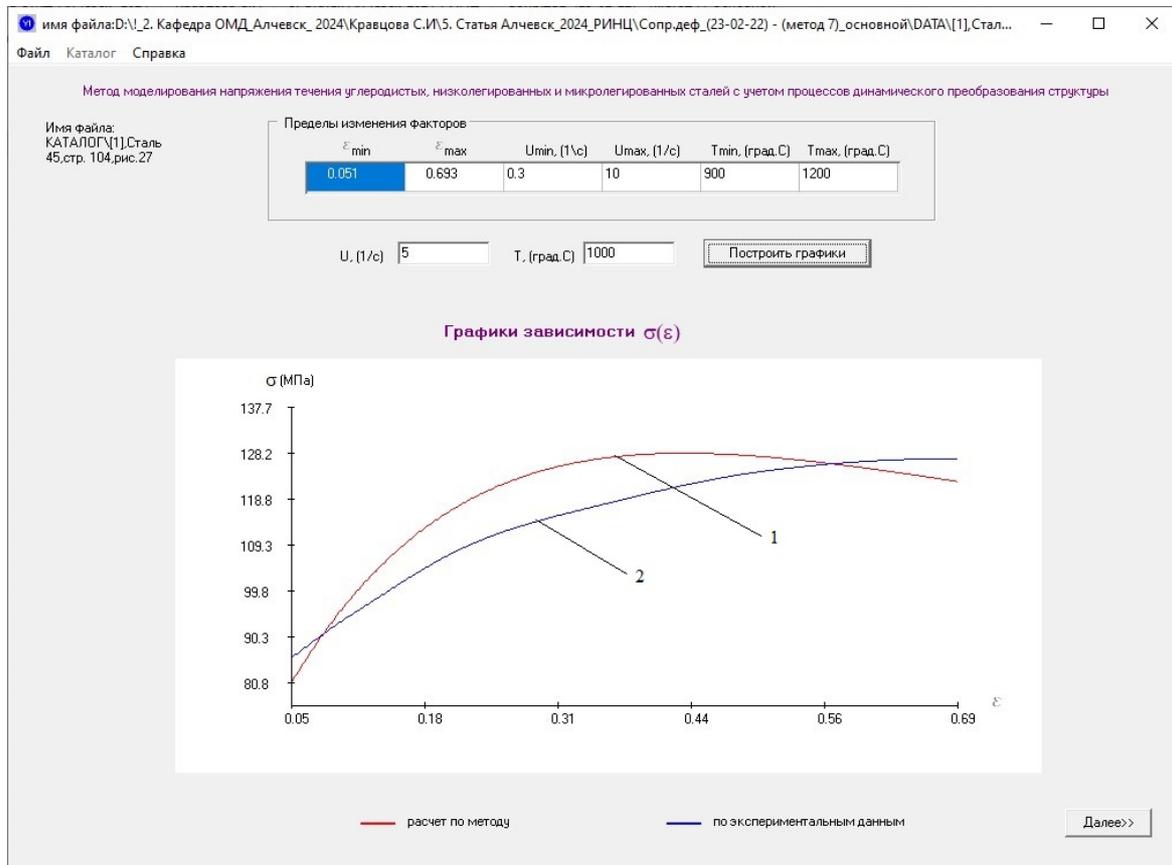


Рисунок 4 — Результаты анализа метода В. С. Солода и др. [5]

МЕТАЛЛУРГИЯ

Метод уточняющий параметры формулы Солода В.С. и др.

Количество марок стали: 1

Пределы изменения факторов

Сталь 0.06C-0.12Si-0.42Mn	ϵ min	ϵ max	U min (1/c)	U max (1/c)	T min. (град.С)	T max. (град.С)
	0.001	0.693	0.01	0.1	900	1100

Расчет напряжения течения металла

по экспериментальным кривым упрочнения

Количество ϵ : 500
Количество T: 20
Количество U: 20

Переход к каталогу
Удалить марку стали

Химический состав (%)

Наименование	Сталь 0.06C-0.12Si-0.42Mn
C (0.05 - 1.1)	0.06
Si (0 - 1.65)	0.12
Mn (0.03 - 1.55)	0.42
Cr (0 - 0.3)	
Ni (0 - 0.3)	
P (0 - 0.05)	0.002
S (0 - 0.05)	0.005
V (0 - 0.26)	
Cu (0 - 0.28)	0.13

Выполнить

n	ϵ	U (1/c)	T (град.С)	$\sigma_{\text{эксп.}}$ (МПа)
53529	0.039830	0.043158	952.631579	49.796
53530	0.041216	0.043158	952.631579	51.134
53531	0.042603	0.043158	952.631579	52.408
53532	0.043990	0.043158	952.631579	53.613
53533	0.045377	0.043158	952.631579	54.741
53534	0.046764	0.043158	952.631579	55.787
53535	0.048150	0.043158	952.631579	56.743
53536	0.049537	0.043158	952.631579	57.604
53537	0.050924	0.043158	952.631579	58.380
53538	0.052311	0.043158	952.631579	59.125
53539	0.053697	0.043158	952.631579	59.842
53540	0.055084	0.043158	952.631579	60.534

Выполнить

по формулам Солода В.С. и др.

Выполнить

n1	72.06	m1	0.131
n2	51.66	m2	0.149
n3	0.193	m3	0.112
n4	0.268	m4	0.107

Сталь 0.06C-0.12Si-0.42Mn
Q: 129311.108783

n	$\sigma_{\text{расч.}}$ (МПа)	Δ (%)
53529	37.954	23.782
53530	38.514	24.680
53531	39.067	25.456
53532	39.612	26.114
53533	40.150	26.654
53534	40.681	27.078
53535	41.204	27.386
53536	41.719	27.575
53537	42.228	27.667
53538	42.730	27.730
53539	43.224	27.770
53540	43.711	27.790

Δ ср (%) 27.277

по уточненным параметрам формулы Солода В.С. и др.

Начальные параметры

n1	95.538213	m1	0.277199
n2	85.875312	m2	0.248718
n3	0.113357	m3	0.362807
n4	0.232920	m4	0.259674

Выполнить

n1	95.520267	m1	0.277277
n2	85.912164	m2	0.248873
n3	0.113126	m3	0.362153
n4	0.232839	m4	0.258866

Новая итерация

n	$\sigma_{\text{расч.}}$ (МПа)	Δ (%)
53529	46.057	7.509
53530	47.134	7.823
53531	48.189	8.050
53532	49.221	8.192
53533	50.231	8.238
53534	51.219	8.187
53535	52.186	8.032
53536	53.131	7.764
53537	54.057	7.406
53538	54.962	7.042
53539	55.846	6.678

Δ ср (%) 9.626

Графики <<Назад

Рисунок 5 — Результаты анализа методов [5] и [7]

Метод моделирования напряжения течения углеродистых, низколегированных и микрелегированных сталей с учетом процессов динамического преобразования структуры

Имя файла: КАТАЛОГ\Сталь 0.06C-0.12Si-0.42Mn

Пределы изменения факторов

0.05	ϵ min	ϵ max	U min (1/c)	U max (1/c)	T min. (град.С)	T max. (град.С)
	0.005	0.693	0.01	0.1	900	1100

Химический состав (%)

C (0.05 - 1.1)	0.06
Si (0 - 1.65)	0.12
Mn (0.03 - 1.55)	0.42
Cr (0 - 0.3)	
Ni (0 - 0.3)	
P (0 - 0.05)	0.002
S (0 - 0.05)	0.005
V (0 - 0.26)	
Cu (0 - 0.28)	0.13

Кодовые и натуральные значения факторов

Кодовые значения факторов	-1.2154	-1	0	+1	+1.2154
Натуральные значения факторов	ϵ	U (1/c)	T (град.С)		
	0.05	0.1070	0.3715	0.6360	0.693
	0.01	0.018	0.095	0.092	0.1
	900	917.723	1000.000	1082.277	1100

План-матрица эксперимента

X1	X2	X3	ϵ	U (1/c)	T (град.С)	$\sigma_{\text{эксп.}}$ (МПа)	
1	-1	-1	-1	0.1070	0.018	917.723	78.630
2	+1	-1	-1	0.6360	0.018	917.723	83.419
3	-1	+1	-1	0.1070	0.092	917.723	94.525
4	+1	+1	-1	0.6360	0.092	917.723	112.474
5	-1	-1	+1	0.1070	0.018	1082.277	52.324
6	+1	-1	+1	0.6360	0.018	1082.277	50.380
7	-1	+1	+1	0.1070	0.092	1082.277	61.503
8	+1	+1	+1	0.6360	0.092	1082.277	60.721
9	-1.2154	0	0	0.05	0.095	1000.000	51.838
10	+1.2154	0	0	0.693	0.095	1000.000	73.315
11	0	-1.2154	0	0.3715	0.01	1000.000	60.345
12	0	+1.2154	0	0.3715	0.1	1000.000	84.930
13	0	0	-1.2154	0.3715	0.095	900	117.236
14	0	0	+1.2154	0.3715	0.095	1100	55.460
15	0	0	0	0.3715	0.095	1000.000	74.281

Проверка адекватности модели по критерию Фишера (уровень значимости - 5%)
Fрасч 30.848 Fтабл 3.59 Fрасч > Fтабл (адекватность обоснована)

Результаты расчета

$$\sigma = \sigma_y + (\sigma_p - \sigma_y) \cdot \left(\frac{\epsilon - \epsilon_p}{\epsilon_x} + 1 \right) \cdot \exp \left(\frac{\epsilon_p - \epsilon}{\epsilon_x} \right)$$

σ (МПа)	Δ (%)
71.480	9.093
71.392	14.417
97.407	3.049
112.059	0.369
48.916	6.513
47.266	6.181
71.291	15.915
71.150	17.176
51.836	0.005
75.825	3.424
49.556	17.878
94.553	11.331
109.574	6.535
60.796	9.622

Δ ср (%) 8.520

Справка

Q: 134162.109
A: 29278.339

Q по формуле В.С. Солода и др.
 Q по формуле S.F. Medina и др.
 Q по объединенной формуле
 Усовершенствованный метод

Выполнить Дополнительно Графики <<Назад Далее>>

Рисунок 6 — Результаты анализа при использовании метода [7]

МЕТАЛЛУРГИЯ

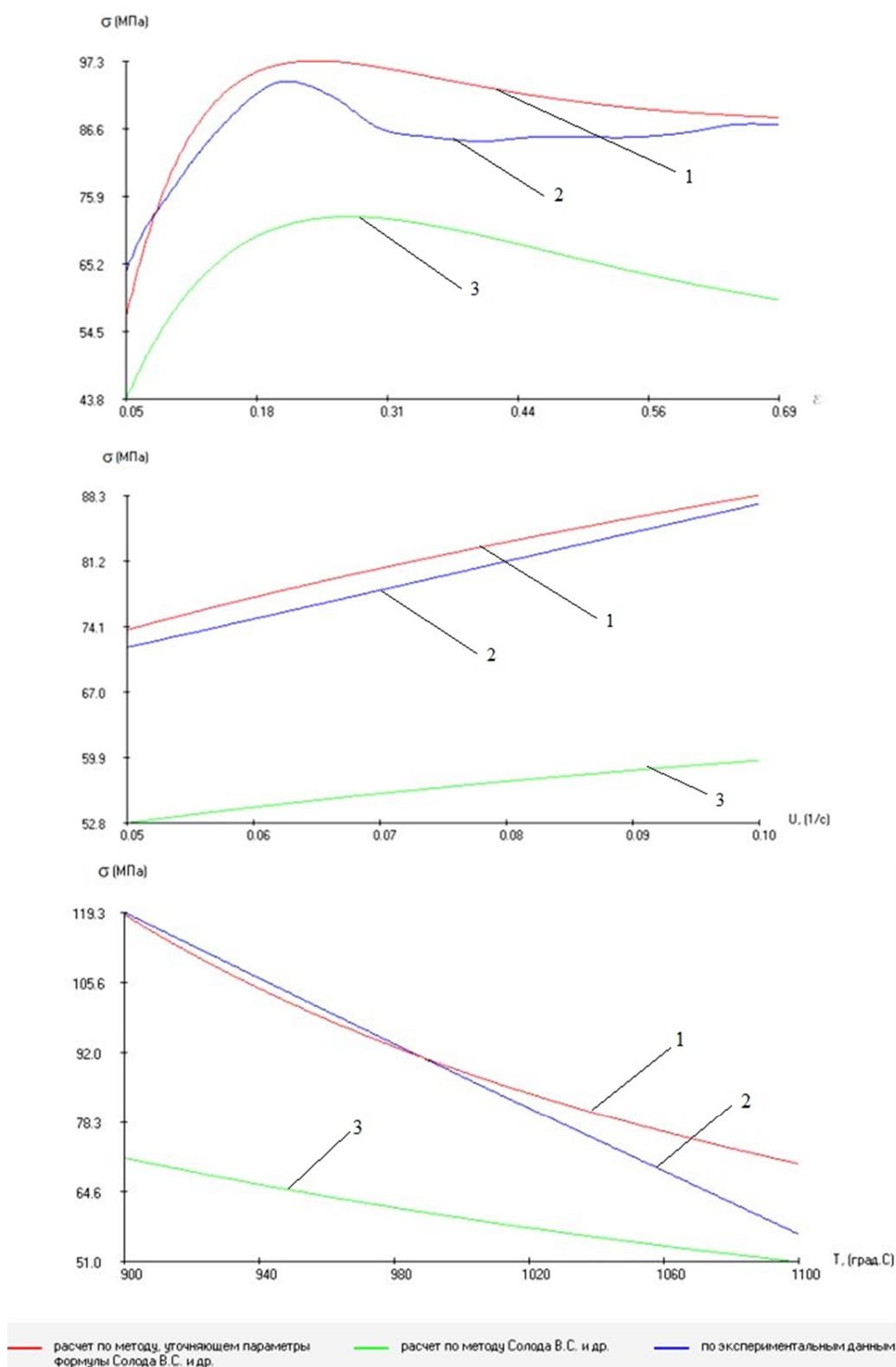


Рисунок 7 — Экспериментальные и расчётные кривые напряжения течения стали 0,06C–0,12Si–0,42Mn по методу [5] и с учетом метода [7]: $\sigma = f(\varepsilon)$ при $U = 0,1$, $T = 1000^\circ\text{C}$; $\sigma = f(U)$ при $\varepsilon = 0,693$, $T = 1000^\circ\text{C}$; $\sigma = f(T)$ при $\varepsilon = 0,693$, $U = 0,1$

Выполненные исследования позволили сделать следующие **выводы**:

1. Актуальность анализа известных методов Л. В. Андреюка и др., В. А. Николаева, В. И. Зюзина и В. С. Солода и др. расчета напряжения течения металла в процессах горячей пластической деформации при значениях степени деформации в диапазоне 0,05–0,5 заключается в том, что они были разработаны на базе экспериментальной информации, полученной в основном в указанном диапазоне.

2. Анализ напряженно-деформированного состояния металла в процессах обработки металлов давлением в основном выполняются на базе конечно-элементного моделирования. При этом в конкретных точках очага деформации могут встречаться различные сочетания значений факторов степени деформации ϵ , скорости деформации U и температуры T . Сравнительный анализ по рассмотренным методам расчетных и экспериментальных данных для одних и тех же условий выполнен с учетом научно-обоснованного выбора наиболее рациональных точек в области изменения факторов ϵ , U , T путем реализации планируемого эксперимента. Соответствующие экспериментальные значения напряжения течения металла определялись методом компьютерной сплайн-интерполяции экспериментальной информации.

3. Получены следующие результаты анализа точности методов применительно к стали 45. По методу Л. В. Андреюка и др. средняя относительная погрешность расчетных значений по отношению к экспериментальным равна 10 %, при отдельных сочетаниях факторов она достигает 27 %. По методу В. А. Николаева средняя относительная погрешность расчетных значений по отношению к экспериментальным равна 11 %, при отдельных сочетаниях факторов она достигает 24 %. По методу В. И. Зюзина средняя относительная погрешность расчетных значений по отношению к экспериментальным равна 5 %, при отдельных сочетаниях факторов она дости-

гает 15 %. По методу В. С. Солода и др. средняя относительная погрешность расчетных значений по отношению к экспериментальным равна 8 %, при отдельных сочетаниях факторов она достигает 28 %.

4. Анализ методов в диапазоне значений степени деформации от 0,05 до 0,5, выполненный для 25 марок конструкционных, инструментальных и нержавеющей сталей, показал, что по методу Л. В. Андреюка и др. средняя относительная погрешность составила 21 % (максимальная относительная погрешность для отдельных марок сталей равна 50 %). По методу В. А. Николаева средняя относительная погрешность составила 15 % (максимальная относительная погрешность для отдельных марок сталей равна 35 %). По методу В. И. Зюзина средняя относительная погрешность составила 5 % (максимальная относительная погрешность для отдельных марок сталей равна 15 %).

5. Анализ метода В. С. Солода и др., учитывающего процессы динамического преобразования структуры металла при его горячей пластической деформации (в диапазоне значений степени деформации от 0,05 до 0,5) при исследовании стали 0,06C–0,12Si–0,42Mn, показал, что средняя относительная погрешность по отношению к экспериментальной информации составила 27 %. Установлено, что с учетом метода уточнения констант, определяющих термокинетические параметры в формуле расчета напряжения течения металла, средняя относительная погрешность равна 10 %.

6. В методах Л. В. Андреюка и др., В. А. Николаева и В. С. Солода и др. формулы, а также входящие в них константы определены и используются для групп марок сталей. По ним получены сравнительно высокие значения погрешностей. В формуле В. И. Зюзина константы определены и используются для одной марки стали. В методе уточнения констант, определяющих термокинетические параметры в формуле расчета напряжения течения металла, также допускается определение и использование указанных констант для одной марки стали. В частности, этим

можно объяснить более высокую точность двух последних методов.

Направление дальнейших исследований связано с расчетом уточненных констант,

определяющих термокинетические параметры в формуле расчета напряжения течения металла, для широкого круга марок сталей.

Список источников

1. Полухин П. И., Гун Г. Я. *Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов : справочник*. М. : Металлургия, 1983. 352 с.
2. Андreyuk Л. В., Тюленев Г. Г., Прицкер Б. С. *Аналитическая зависимость сопротивления деформации сталей и сплавов от их химического состава // Сталь*. 1972. № 6. С. 522–523.
3. Николаев В. А. *Теория прокатки : монография*. Запорожье : ЗГИА, 2007. 228 с.
4. *Теория прокатки : справочник / А. И. Целиков [и др.]*. М. : Металлургия, 1982. 335 с.
5. Солод В. С., Бейгельзимер Я. Е., Кулагин Р. Ю. *Математическое моделирование сопротивления деформации при горячей прокатке углеродистых сталей // Металлы и литье Украины*. 2006. № 7–8. С. 52–56.
6. Яковченко А. В., Снитко С. А., Ивлева Н. И. *Методы компьютерного моделирования напряжения течения металла в процессах горячей пластической деформации : учебное пособие*. Донецк : ДонНТУ, 2018. 197 с.
7. *Метод уточнения констант, определяющих термокинетические параметры в формуле расчета напряжения течения металла / А. В. Яковченко, П. Н. Денищенко, С. И. Кравцова, Н. И. Ивлева // Сборник научных трудов ДонГТИ*. 2022. Вып. 26 (69). С. 29–39.

© Яковченко А. В., Денищенко П. Н., Кравцова С. И.

**Рекомендована к печати к.т.н., проф. каф. МТ ДонГТУ Куберским С. В.,
и.о. начальника ЦЛК ООО «ЮГМК» Давыдовым И. Е.**

Статья поступила в редакцию 12.12.2024.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Яковченко Александр Васильевич, д-р. техн. наук., профессор каф. металлургических технологий Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск, Россия

Денищенко Павел Николаевич, канд. техн. наук, профессор каф. металлургических технологий Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск, Россия

Кравцова Светлана Игоревна, ассистент каф. металлургических технологий Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск, Россия,
e-mail: kravtsosveta@gmail.com

Yakovchenko A. V., Denishchenko P. N., *Kravtsova S. I. (Donbass State Technical University, Alchevsk, Russia, *e-mail: kravtsosveta@gmail.com)

ANALYSIS OF METHODS FOR CALCULATING METAL FLOW TENSION IN HOT PLASTIC DEFORMATION PROCESSES AT VALUES OF DEFORMATION DEGREE IN THE RANGE OF 0,05–0,5

The accuracy of methods of L. V. Andreyuk et al., V. A. Nikolaev, V. I. Zyuzin, V. S. Solod et al. for calculating metal flow tension in hot plastic deformation processes at values of deformation degree in the range of 0,05–0,5 with respect to experimental data has been analyzed. The comparative analysis of

calculated and experimental data for the same conditions is carried out considering the scientifically justified choice of the most rational points in the area of changing values of the deformation degree factors, strain rate and metal temperature by implementing the planned experiment. The corresponding experimental values of metal flow tension were determined by computerized spline interpolation of the experimental information.

Key words: metal flow tension, hot plastic deformation, deformation degree, strain rate, metal temperature, planned experiment, spline interpolation of experimental information.

References

1. Poluhin P. I., Gun G. Ya. Plastic deformation resistance of metals and alloys : a reference book. [Soprotivlenie plasticheskoy deformacii metallov i splavov : spravochnik]. M. : Metalurgija, 1983. 352 p. (rus)
2. Andreyuk L. V., Tyulenev G. G., Pritsker B. S. Analytical dependence of deformation resistance of steels and alloys on their chemical composition [Analiticheskaya zavisimost' soprotivleniya deformacii stalej i splavov ot ih himicheskogo sostava]. Stal'. 1972. No. 6. Pp. 522–523. (rus)
3. Nikolaev V. A. Theory of rolling : a monograph [Teoriya prokatki : monografiya]. Zaporozh'e : ZCEA, 2007. 228 p. (rus)
4. Celikov A. I. [i dr.] Rolling theory : a handbook [Teoriya prokatki : spravochnik]. M. : Metalurgija, 1982. 335 p. (rus)
5. Solod V. S., Bejgel'zimer Ya. E., Kulagin R. Yu. Mathematical modeling of deformation resistance during hot rolling of carbon steels [Matematicheskoe modelirovanie soprotivleniya deformacii pri goryachej prokatke uglerodistyh stalej]. Metal and Casting of Ukraine. 2006. No. 7–8. Pp. 52–56. (rus)
6. Yakovchenko A. V., Snitko S. A., Ivleva N. I. Methods of computer modeling of metal flow tension in hot plastic deformation processes : a textbook [Metody komp'yuternogo modelirovaniya napryazheniya techeniya metalla v processah goryachej plasticheskoy deformacii : uchebnoe posobie]. Donetsk : DonNTU, 2018. 197 p. (rus)
7. Yakovchenko A. V., Denishchenko P. N., Kravcova S. I., Ivleva N. I. Method of specifying constants determining thermokinetic parameters in the formula for calculating the metal flow tension [Metod utochneniya konstant, opredelyayushchih termokineticheskie parametry v formule rascheta napryazheniya techeniya metalla]. Collection of Scientific Papers of DonSTI. 2022. Iss. 26 (69). Pp. 29–39. (rus)

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yakovchenko Aleksandr Vasil'evich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Metallurgical Technologies
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Russia

Denishchenko Pavel Nikolayevich, PhD in Engineering, Professor of the Department of Metallurgical Technologies
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Russia

Kravtsova Svetlana Igorevna, Assistant lecturer of the Department of Metallurgical Technologies
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Russia,
e-mail: kravtsosveta@gmail.com