

УДК 621.771.011

д.т.н. Яковченко А. В.,
к.т.н. Денищенко П. Н.,
Кравцова С. И.
(ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР, kravtsosveta@gmail.com),
Ивлева Н. И.
(ДонНИИчермет, г. Донецк, ДНР, ivl22@mail.ru)

УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЕ МЕТОД И КОМПЬЮТЕРНАЯ ПРОГРАММА ОПРЕДЕЛЕНИЯ УТОЧНЕННЫХ КОНСТАНТ ФОРМУЛ РАСЧЕТА ТЕРМОКИНЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ ГРУПП МАРОК СТАЛЕЙ

Разработаны усовершенствованные метод и компьютерная программа расчета уточненных констант формул, определяющих термокинетические параметры в теории расчета напряжения течения металла с учетом процессов динамического преобразования его структуры при горячей пластической деформации как для отдельных марок сталей, так и для групп (до 25 марок сталей). Выполнен расчет уточненных констант формул, определяющих термокинетические параметры для групп из двух марок сталей: 0,5С — 0,2Si — 0,68Mn, 0,06С — 0,12Si — 0,42Mn и трёх марок сталей: 45, 08, 55. При этом средние относительные отклонения расчетных значений напряжения течения металла по отношению к экспериментальным составили 4–10 %.

Ключевые слова: напряжение течения металла при горячей пластической деформации; константы, определяющие термокинетические параметры; компьютерная база цифровой информации об экспериментальных кривых напряжения течения металла; сплайн-интерполяция кривых течения; компьютерная программа.

В работе [1] показано, что константы, определяющие термокинетические параметры в формуле (1) [2] расчета напряжения течения металла с учётом процессов динамического преобразования его структуры при горячей пластической деформации не обеспечивают приемлемую точность расчетов во всем заявленном диапазоне изменения состава химических элементов:

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

где σ_y , σ_p , ε_p , 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 .

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

$$\begin{aligned} \sigma_p &= n_1 \cdot \left(\frac{Z}{A} \right)^{m_1}; \sigma_y = n_2 \cdot \left(\frac{Z}{A} \right)^{m_2}; \\ \varepsilon_x &= n_3 \cdot \left(\frac{Z}{A} \right)^{m_3}; \varepsilon_p = n_4 \cdot \left(\frac{Z}{A} \right)^{m_4}, \end{aligned} \quad (2)$$

а входящие в них константы, найденные в работе [2], равны

$$\begin{aligned} n_1 &= 72,06, m_1 = 0,131, n_2 = 51,66, m_2 = 0,149, \\ n_3 &= 0,193, m_3 = 0,112, n_4 = 0,268, m_4 = 0,107. \end{aligned}$$

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 (Z)); A — скоростная константа деформируемого материала [2].

В формулах (2) [2] значения констант n_1 , m_1 , n_2 , m_2 , n_3 , m_3 , n_4 , m_4 найдены на базе информации, полученной из экспериментальных кривых течения для группы, включающей 27 марок углеродистых сталей.

Известно, что проблема моделирования реологических свойств относится к наиболее важным и сложным задачам теории обработки металлов давлением. Важное значение теория [2] расчета напряжения течения металла с учётом процессов динамического преобразования его структуры при горячей пластической деформации получила в процессе реализации конечно-элементных методов исследований напряженно-деформированного состояния металла в процессах обработки металлов давлением. Поэтому задача определения уточненных значений констант $n_1, m_1, n_2, m_2, n_3, m_3, n_4, m_4$ для различных групп марок сталей имеет высокую актуальность.

В работе поставлена задача разработки усовершенствованного метода и компьютерной программы расчета уточненных констант формул расчета термокинетических параметров для различных групп марок сталей. На базе созданной в работе [1]

математической модели планируется определить уточненные константы, входящие в формулы расчета термокинетических параметров, для двух групп марок углеродистых сталей. Также будет выполнен сравнительный анализ относительных отклонений расчетных значений напряжения течения σ (полученных на базе исходных [2] и уточненных констант) по отношению к экспериментальным данным.

С использованием математической модели, полученной в [1], разработаны усовершенствованные метод и компьютерная программа расчёта уточненных констант $n_1, m_1, n_2, m_2, n_3, m_3, n_4, m_4$, определяющих термокинетические параметры в формуле (2) [2] расчета напряжения течения металла для различных групп марок сталей. Окно усовершенствованной программы показано на рисунке 1. Предусмотрена возможность включения в группу до 25 марок сталей.

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

Количество марок стали: 2

Пределы изменения факторов

	ϵ_{\min}	ϵ_{\max}	U min (1/c)	U max (1/c)	T min. (град.С)	T max. (град.С)
Сталь 0.50C-0.25i-0.68Mn	0.05	1.8	0.01	0.1	900	1100
Сталь 0.06C-0.12Si-0.42Mn	0.05	1.8	0.01	0.1	900	1100

Расчет напряжения течения металла

по экспериментальным кривым упрочнения

Количество ϵ : 100
Количество T: 10
Количество U: 10

Химический состав (%)

Наименование	Сталь 0.50C-0.25i-0.68Mn
C (0.05 - 1.1)	0.50
Si (0 - 1.65)	0.2
Mn (0.03 - 1.55)	0.68
Cr (0 - 0.3)	
Ni (0 - 0.3)	
P (0 - 0.05)	0.002
S (0 - 0.05)	0.038
V (0 - 0.26)	
Cu (0 - 0.28)	0.28

по формулам Солода В.С. и др.

Выполнить

n	m
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 0.50C-0.25i-0.68Mn

Q 212395.631065

n	$\sigma_{\text{расч.}}$ (МПа)	Δ (%)
1 42.207	30.660	
2 48.160	28.797	
3 53.105	27.546	
4 57.175	26.870	
5 60.488	26.456	
6 63.147	26.210	
7 65.243	26.224	
8 66.855	26.368	
9 68.053	26.532	
10 68.899	26.697	
11 69.446	26.873	
12 69.741	26.718	

Δ ср (%) 26.200

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

Начальные параметры

n	m
n1 87.683658	m1 0.209860
n2 80.444385	m2 0.209331
n3 0.106152	m3 0.166243
n4 0.223541	m4 0.151958

Выполнить

Новая итерация

n	$\sigma_{\text{расч.}}$ (МПа)	Δ (%)
1 54.810	9.956	
2 63.334	6.361	
3 69.696	4.911	
4 74.366	4.882	
5 77.723	5.502	
6 80.065	6.440	
7 81.632	7.692	
8 82.609	9.017	
9 83.146	10.238	
10 83.357	11.314	
11 83.333	12.250	

Δ ср (%) 8.404

Графики <<Назад

Рисунок 1 Окно расчета уточненных констант для групп марок сталей (на примере сталей 0,5C—0,2Si—0,68Mn и 0,06C—0,12Si—0,42Mn)

В верхнюю часть окна передается информация о пределах изменения факторов ε , U , T в соответствии с разработанными на основе метода [4] базами цифровой экспериментальной информации о напряжении течения для каждой стали.

Ниже в окне задается химический состав каждой стали, который используется при расчете величины энергии активации деформации Q по формуле [2]. Предусмотрена возможность просмотра информации поочередно для каждой стали, входящей в группу.

Слева в окне задаются цифровые значения, например $\varepsilon(100)$, $T(10)$, $U(10)$, которые означают следующее. Так, при каждом из 10 значений температуры (в пределах изменения фактора T) выполняется построение 10 кривых $\sigma=f(\varepsilon)$ напряжения течения каждой стали по экспериментальным данным при 10 фиксированных значениях скорости деформации (в пределах изменения фактора U). Затем по каждой кривой течения стали при 100 фиксированных значениях степени деформации (в пределах изменения фактора ε) выполняется определение соответствующих значений σ . При этом используются компьютерная база цифровой экспериментальной информации о напряжении течения каждой стали и предложенный в [4] метод сплайн-интерполяции при определении значений напряжения течения металла, причём не только для точек, лежащих на кривых течения, но и для любых других сочетаний значений степени деформации ε , скорости деформации U и температуры T в диапазоне их изменения на исходных экспериментальных кривых.

Массив значений ε , U , T , σ для всех сталей отображается в левой нижней части окна программы. При заданных значениях $\varepsilon(100)$, $T(10)$, $U(10)$ массив включает 100 тыс. значений σ при соответствующих значениях степени, скорости деформации и температуры. Указанные выше цифровые значения, определяющие указанный массив, в процессе расчета можно изме-

нять, добиваясь наилучшей точности расчёта искомым констант.

В [7] разработана функция компьютерной программы расчета напряжения течения металла по формуле (1), учитывающей процессы динамического преобразования структуры металла при его горячей пластической деформации, которая используется в настоящих исследованиях. В средней части окна выполняется расчет соответствующих значений σ по этой формуле, то есть с учётом исходных констант, приведенных под формулой (2). При этом определяется среднее относительное отклонение расчетных значений по отношению к экспериментальным. Указанное отклонение, найденное по двум маркам сталей по 100 тыс. точек равно 26,2 %.

Затем на базе математической модели [1] выполняется определение уточненных констант $n_1, m_1, n_2, m_2, n_3, m_3, n_4, m_4$. При этом для различных марок сталей определяются и учитываются соответствующие значения величины энергии активации деформации Q . Найденные уточненные константы даются под окошком «Выполнить» (см. рис. 1) в правой части окна программы.

В правом верхнем углу окна задаются используемые в математической модели исходные константы. На первом этапе в качестве исходных констант в автоматическом режиме задаются и используются константы, найденные в работе [2]. На следующих этапах расчёта исходные константы можно корректировать для получения лучшего результата. Также в процессе расчёта уточненных констант можно организовать итерационный процесс, при котором найденные на предыдущем шаге значения задаются в качестве исходных на следующем шаге. Это важный элемент усовершенствованного метода определения уточненных констант.

В правой части окна выполняется расчет соответствующих значений σ на базе уточненных констант, определяющих термокинетические параметры (2) в формуле расче-

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

та напряжения течения металла (1). При этом среднее относительное отклонение расчетных значений по отношению к экспериментальным, найденное по двум маркам сталей по 100 тыс. точек, равно 8,4 %.

Функция программы «Переход к каталогу» дает возможность добавить компьютерную базу экспериментальных данных по напряжению течения для следующей марки стали. Возможно также и удалить любую из ранее заданных марок сталей.

На рисунках 2–5 в окнах программы представлены результаты расчетов по проверке точности аппроксимации экспериментальных данных, выполненные по методу и программе, созданным в работе [4].

Средние относительные отклонения расчетных значений напряжения течения σ по отношению к экспериментальным показаны в таблице 1. В окнах, представленных на рисунках 3 и 5, установлено, что проверка адекватности модели на базе исходных констант [2] по критерию Фишера дала неудовлетворительные результаты.

На рисунке 6 приведены соответствующие экспериментальные (показаны линией 1) и расчётные (показаны линиями 2, 3) кривые. Расчётные кривые, полученные на базе исходных констант [2], показаны линией 2. Расчётные кривые, полученные на базе уточненных в настоящей работе констант, показаны линией 3.

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

Имя файла: КАТАЛОГ\Сталь 0,50C-0,2Si-0,68Mn

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	1.8	0.01	0.1	900	1100

Химический состав (%)

C (0.05 - 1.1)	0.50
Si (0 - 1.65)	0.2
Mn (0.03 - 1.55)	0.68
Cr (0 - 0.3)	
Ni (0 - 0.3)	
P (0 - 0.05)	0.002
S (0 - 0.05)	0.038
V (0 - 0.25)	
Cu (0 - 0.28)	0.28

Кодовые и натуральные значения факторов

Кодовые значения факторов	-1.2154	-1	0	+1	+1.2154	
Натуральные значения факторов	ε	0.05	0.2051	0.9250	1.6449	1.8
	U (1/c)	0.01	0.018	0.055	0.092	0.1
	T (град.С)	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	0.2051	0.018	917.723	92.359
2	+1	-1	-1	1.6449	0.018	917.723	80.292
3	-1	+1	-1	0.2051	0.092	917.723	116.633
4	+1	+1	-1	1.6449	0.092	917.723	109.495
5	-1	-1	+1	0.2051	0.018	1082.277	46.049
6	+1	-1	+1	1.6449	0.018	1082.277	43.712
7	-1	+1	+1	0.2051	0.092	1082.277	62.491
8	+1	+1	+1	1.6449	0.092	1082.277	57.373
9	-1.2154	0	0	0.05	0.055	1000.000	57.940
10	+1.2154	0	0	1.8	0.055	1000.000	71.272
11	0	-1.2154	0	0.9250	0.01	1000.000	52.632
12	0	+1.2154	0	0.9250	0.1	1000.000	76.019
13	0	0	-1.2154	0.9250	0.055	900	100.760
14	0	0	+1.2154	0.9250	0.055	1100	50.241
15	0	0	0	0.9250	0.055	1000.000	71.263

Результаты расчета

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

σ (МПа)	Δ (%)
87.980	4.741
80.840	0.682
121.416	4.101
113.772	3.906
50.292	9.213
46.860	7.201
71.819	14.926
65.946	14.942
54.765	5.480
76.411	7.210
53.471	1.594
86.723	14.081
109.789	8.961
56.274	12.008

$\Delta_{\text{ср}}$ (%) 7.756

Проверка адекватности модели по критерию Фишера (уровень значимости - 5%)
 Fрасч 52.931 Fтабл 3.59 Fрасч > Fтабл (адекватность обоснована)

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

Рисунок 2 Проверка точности аппроксимации экспериментальных данных по стали 0,5C—0,2Si—0,68Mn [3] на базе уточненных констант

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

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

Имя файла: КАТАЛОГ\Сталь 0,50C-0,2Si-0,68Mn

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	1.8	0.01	0.1	900	1100

Химический состав (%)

C (0.05 - 1.1)	0.50
Si (0 - 1.65)	0.2
Mn (0.03 - 1.55)	0.68
Cr (0 - 0.3)	
Ni (0 - 0.3)	
P (0 - 0.05)	0.002
S (0 - 0.05)	0.038
V (0 - 0.26)	
Cu (0 - 0.28)	0.28

Кодовые и натуральные значения факторов

Кодовые значения факторов	ε	U (1/c)	T (град.С)	
-1, 2154	-1	0	+1, 2154	
0.05	0.2051	0.9250	1.6449	1.8
0.01	0.018	0.055	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	0.2051	0.018	917.723	92.359
2	+1	-1	-1	1.6449	0.018	917.723	80.292
3	-1	+1	-1	0.2051	0.092	917.723	116.633
4	+1	+1	-1	1.6449	0.092	917.723	109.495
5	-1	-1	+1	0.2051	0.018	1082.277	46.049
6	+1	-1	+1	1.6449	0.018	1082.277	43.712
7	-1	+1	+1	0.2051	0.092	1082.277	62.491
8	+1	+1	+1	1.6449	0.092	1082.277	57.373
9	-1.2154	0	0	0.05	0.055	1000.000	57.940
10	+1.2154	0	0	1.8	0.055	1000.000	71.272
11	0	-1.2154	0	0.9250	0.01	1000.000	52.632
12	0	+1.2154	0	0.9250	0.1	1000.000	76.019
13	0	0	-1.2154	0.9250	0.055	900	100.760
14	0	0	+1.2154	0.9250	0.055	1100	50.241
15	0	0	0	0.9250	0.055	1000.000	71.263

Результаты расчета

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

σ (МПа)	Δ (%)
70.903	23.231
51.975	35.268
85.503	26.691
66.627	39.151
51.390	11.597
36.178	19.523
63.142	1.042
44.900	21.739
42.180	27.200
49.853	30.053
39.630	24.704
57.983	23.726
70.029	30.499
41.223	17.950

Δ ср (%) 23.919

Q 212395.631
A 36174093.436

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%)
Fрасч 1.465 Fтабл 3.59 Fрасч < Fтабл (адекватность не обоснована)

Выполнить

Рисунок 3 Проверка точности аппроксимации экспериментальных данных по стали 0,5C—0,2Si—0,68Mn [3] на базе исходных констант [2]

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

Имя файла: КАТАЛОГ\Сталь 0,06C-0,12Si-0,42Mn

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	1.8	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	ε	U (1/c)	T (град.С)	
-1, 2154	-1	0	+1, 2154	
0.05	0.2051	0.9250	1.6449	1.8
0.01	0.018	0.055	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	0.2051	0.018	917.723	93.508
2	+1	-1	-1	1.6449	0.018	917.723	83.080
3	-1	+1	-1	0.2051	0.092	917.723	115.586
4	+1	+1	-1	1.6449	0.092	917.723	111.072
5	-1	-1	+1	0.2051	0.018	1082.277	51.419
6	+1	-1	+1	1.6449	0.018	1082.277	49.759
7	-1	+1	+1	0.2051	0.092	1082.277	62.747
8	+1	+1	+1	1.6449	0.092	1082.277	61.014
9	-1.2154	0	0	0.05	0.055	1000.000	51.838
10	+1.2154	0	0	1.8	0.055	1000.000	73.378
11	0	-1.2154	0	0.9250	0.01	1000.000	62.083
12	0	+1.2154	0	0.9250	0.1	1000.000	87.333
13	0	0	-1.2154	0.9250	0.055	900	107.733
14	0	0	+1.2154	0.9250	0.055	1100	54.285
15	0	0	0	0.9250	0.055	1000.000	73.434

Результаты расчета

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

σ (МПа)	Δ (%)
74.053	20.806
67.970	18.187
103.404	10.539
95.656	13.879
52.471	2.047
48.768	1.991
74.780	19.177
68.631	12.485
52.425	1.133
71.972	1.916
50.364	18.876
81.653	6.504
89.655	16.780
59.747	10.062

Δ ср (%) 10.422

Q 129311.109
A 18829.164

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%)
Fрасч 8.262 Fтабл 3.59 Fрасч > Fтабл (адекватность обоснована)

Выполнить

Рисунок 4 Проверка точности аппроксимации экспериментальных данных по стали 0,06C—0,12Si—0,42Mn [3] на базе уточненных констант

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

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

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

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	1.8	0.01	0.1	900	1100

Химический состав (%)

Элемент	Содержание (%)
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	ε	U (1/c)	T (град.С)	$\sigma_{\text{эксп}}$ (МПа)
-1.2154	-1	0	900	93.508
-1	0	0	900	83.080
0	0	0	900	115.586
+1	0	0	900	111.072
+1.2154	+1	0	900	51.419
-1	0	0	1082.277	49.759
-1	0	0	1082.277	62.747
+1	0	0	1082.277	61.014
+1	0	0	1082.277	51.838
-1.2154	0	0	1000.000	73.378
+1.2154	0	0	1000.000	62.083
0	0	0	1000.000	87.333
0	0	0	1000.000	107.733
0	0	0	1100	54.285
0	0	0	1000.000	73.434

План-матрица эксперимента

X1	X2	X3	ε	U (1/c)	T (град.С)	$\sigma_{\text{эксп}}$ (МПа)
-1	-1	-1	0.2051	0.018	917.723	93.508
+1	-1	-1	1.6449	0.018	917.723	83.080
-1	+1	-1	0.2051	0.092	917.723	115.586
+1	+1	-1	1.6449	0.092	917.723	111.072
-1	-1	+1	0.2051	0.018	1082.277	51.419
+1	-1	+1	1.6449	0.018	1082.277	49.759
-1	+1	+1	0.2051	0.092	1082.277	62.747
+1	+1	+1	1.6449	0.092	1082.277	61.014
-1.2154	0	0	0.05	0.055	1000.000	51.838
+1.2154	0	0	1.8	0.055	1000.000	73.378
0	-1.2154	0	0.9250	0.01	1000.000	62.083
0	+1.2154	0	0.9250	0.1	1000.000	87.333
0	0	-1.2154	0.9250	0.055	900	107.733
0	0	+1.2154	0.9250	0.055	1100	54.285
0	0	0	0.9250	0.055	1000.000	73.434

Результаты расчета

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

σ (МПа)	Δ (%)
64.256	31.283
45.884	44.771
77.819	32.674
58.704	47.147
52.688	2.467
36.194	27.262
64.615	2.978
46.204	24.274
40.737	21.414
47.764	34.907
37.852	39.031
55.258	36.727
59.546	44.728
43.184	20.450

$\Delta_{\text{ср}}$ (%) 29.468

Справка

Проверка адекватности модели по критерию Фишера (уровень значимости - 5%)
 Fрасч 0.552 Fтабл 3.59 Fрасч < Fтабл (адекватность не обоснована)

Выполнить

Рисунок 5 Проверка точности аппроксимации экспериментальных данных по стали 0,06C—0,12Si—0,42Mn [3] на базе исходных констант [2]

Таблица 1

Средние относительные отклонения расчетных значений напряжения течения σ по отношению к экспериментальным, полученных на базе исходных δ_n (2) и уточненных констант δ_y для группы из двух марок сталей

Марки сталей	Химический состав сталей, %	Константы	Отклонение, %																																					
			δ_n	δ_y																																				
0,5C—0,2Si—0,68Mn, [3]	<table border="1"> <thead> <tr><th>Наименование</th><th>Сталь 0.50C-0.2Si-0.68Mn</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>C (0.05 - 1.1)</td><td>0.50</td></tr> <tr><td>Si (0 - 1.65)</td><td>0.2</td></tr> <tr><td>Mn (0.03 - 1.55)</td><td>0.68</td></tr> <tr><td>Cr (0 - 0.3)</td><td></td></tr> <tr><td>Ni (0 - 0.3)</td><td></td></tr> <tr><td>P (0 - 0.05)</td><td>0.002</td></tr> <tr><td>S (0 - 0.05)</td><td>0.038</td></tr> <tr><td>V (0 - 0.26)</td><td></td></tr> <tr><td>Cu (0 - 0.28)</td><td>0.28</td></tr> </tbody> </table>	Наименование	Сталь 0.50C-0.2Si-0.68Mn	C (0.05 - 1.1)	0.50	Si (0 - 1.65)	0.2	Mn (0.03 - 1.55)	0.68	Cr (0 - 0.3)		Ni (0 - 0.3)		P (0 - 0.05)	0.002	S (0 - 0.05)	0.038	V (0 - 0.26)		Cu (0 - 0.28)	0.28	<table border="1"> <tbody> <tr><td>n1</td><td>87.684012</td><td>m1</td><td>0.209691</td></tr> <tr><td>n2</td><td>80.446809</td><td>m2</td><td>0.209433</td></tr> <tr><td>n3</td><td>0.106107</td><td>m3</td><td>0.162897</td></tr> <tr><td>n4</td><td>0.223476</td><td>m4</td><td>0.150220</td></tr> </tbody> </table>	n1	87.684012	m1	0.209691	n2	80.446809	m2	0.209433	n3	0.106107	m3	0.162897	n4	0.223476	m4	0.150220	23,9	7,8
Наименование	Сталь 0.50C-0.2Si-0.68Mn																																							
C (0.05 - 1.1)	0.50																																							
Si (0 - 1.65)	0.2																																							
Mn (0.03 - 1.55)	0.68																																							
Cr (0 - 0.3)																																								
Ni (0 - 0.3)																																								
P (0 - 0.05)	0.002																																							
S (0 - 0.05)	0.038																																							
V (0 - 0.26)																																								
Cu (0 - 0.28)	0.28																																							
n1	87.684012	m1	0.209691																																					
n2	80.446809	m2	0.209433																																					
n3	0.106107	m3	0.162897																																					
n4	0.223476	m4	0.150220																																					
0,06C—0,12Si—0,42Mn, [3]	<table border="1"> <thead> <tr><th>Наименование</th><th>Сталь 0.06C-0.12Si-0.42Mn</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>C (0.05 - 1.1)</td><td>0.06</td></tr> <tr><td>Si (0 - 1.65)</td><td>0.12</td></tr> <tr><td>Mn (0.03 - 1.55)</td><td>0.42</td></tr> <tr><td>Cr (0 - 0.3)</td><td></td></tr> <tr><td>Ni (0 - 0.3)</td><td></td></tr> <tr><td>P (0 - 0.05)</td><td>0.002</td></tr> <tr><td>S (0 - 0.05)</td><td>0.005</td></tr> <tr><td>V (0 - 0.26)</td><td></td></tr> <tr><td>Cu (0 - 0.28)</td><td>0.13</td></tr> </tbody> </table>	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		29,5	10,4																
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																																							

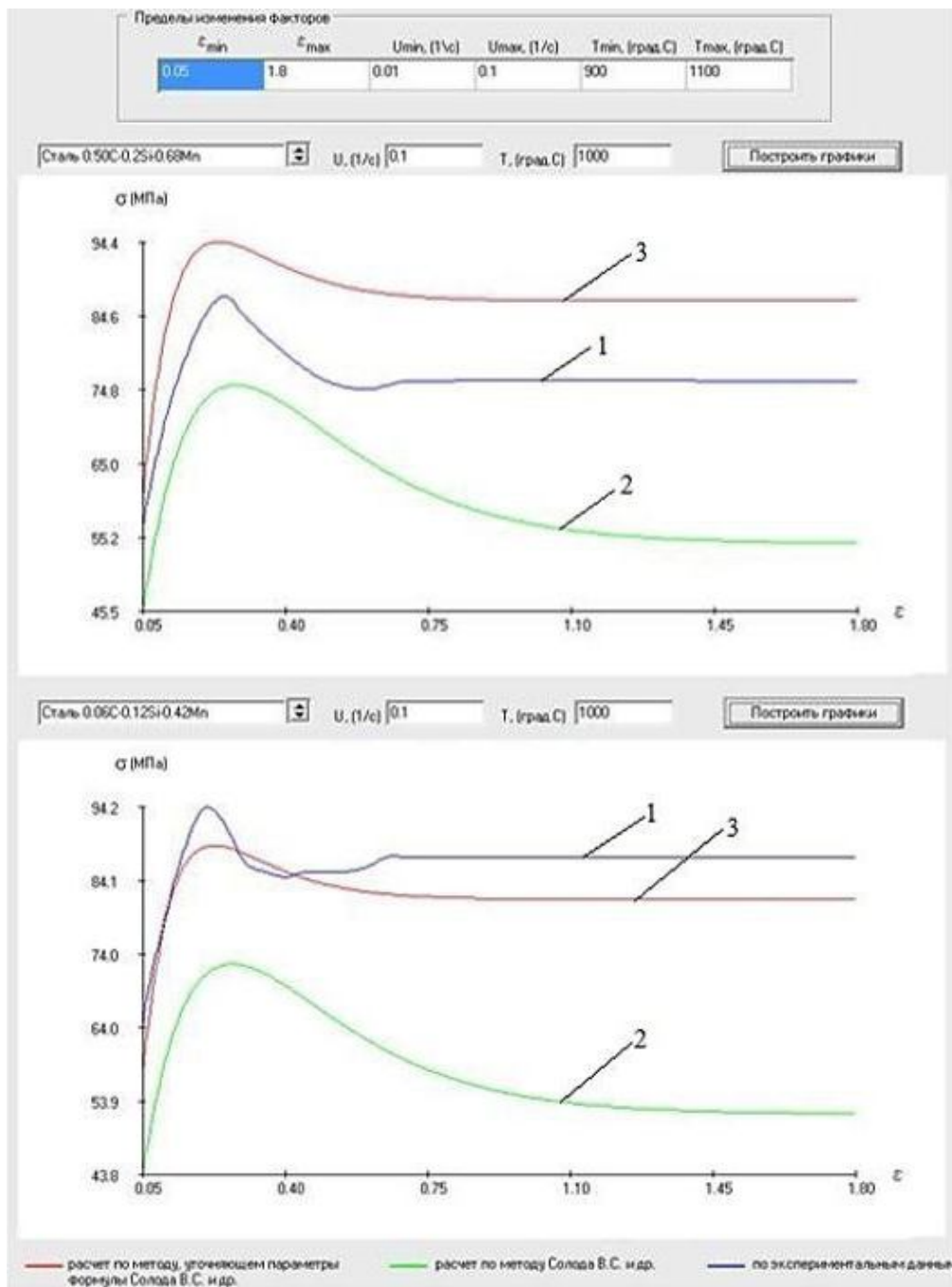


Рисунок 6 Экспериментальные и расчётные кривые напряжения течения сталей 0,5С—0,2Si—0,68Mn и 0,06С—0,12Si—0,42Mn $\sigma=f(\epsilon)$ при фиксированных значениях U , T

Рассмотрим также группу из трёх углеродистых марок сталей. Результаты расчётов уточненных констант, определяющих термокинетические параметры в формуле (2) [2] расчета напряжения течения металла для группы из марок сталей 45, 08, 55 представлены в таблице 2 и на рисун-

ках 7–9. По сталям 08 и 55 средние относительные отклонения расчетных значений напряжения течения σ по отношению к экспериментальным на базе уточненных констант δ_y получены меньшими, чем на базе исходных констант δ_n (2). Результаты расчетов по стали 45 получены близкими.

Таблица 2

Средние относительные отклонения расчетных значений напряжения течения σ по отношению к экспериментальным (для группы из трёх марок сталей)

Марка стали	Химический состав стали, %	Константы	Отклонение, %																																					
			$\delta_{и}$	$\delta_{у}$																																				
Сталь 45, [6]	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Наименование</th> <th>Сталь 45</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>C (0.05 - 1.1)</td><td>0.43</td></tr> <tr><td>Si (0 - 1.65)</td><td>0.26</td></tr> <tr><td>Mn (0.03 - 1.55)</td><td>0.74</td></tr> <tr><td>Cr (0 - 0.3)</td><td></td></tr> <tr><td>Ni (0 - 0.3)</td><td></td></tr> <tr><td>P (0 - 0.05)</td><td>0.022</td></tr> <tr><td>S (0 - 0.05)</td><td>0.016</td></tr> <tr><td>V (0 - 0.26)</td><td></td></tr> <tr><td>Cu (0 - 0.28)</td><td></td></tr> </tbody> </table>	Наименование	Сталь 45	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)		<table border="1"> <tbody> <tr><td>n1</td><td>61.343150</td><td>m1</td><td>0.161166</td></tr> <tr><td>n2</td><td>36.772599</td><td>m2</td><td>0.204126</td></tr> <tr><td>n3</td><td>0.266166</td><td>m3</td><td>0.040946</td></tr> <tr><td>n4</td><td>0.336268</td><td>m4</td><td>0.050152</td></tr> </tbody> </table>	n1	61.343150	m1	0.161166	n2	36.772599	m2	0.204126	n3	0.266166	m3	0.040946	n4	0.336268	m4	0.050152	5,6	6,2
Наименование	Сталь 45																																							
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)																																								
n1	61.343150	m1	0.161166																																					
n2	36.772599	m2	0.204126																																					
n3	0.266166	m3	0.040946																																					
n4	0.336268	m4	0.050152																																					
Сталь 08, [6]	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Наименование</th> <th>Сталь 08</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>C (0.05 - 1.1)</td><td>0.087</td></tr> <tr><td>Si (0 - 1.65)</td><td>0.003</td></tr> <tr><td>Mn (0.03 - 1.55)</td><td>0.34</td></tr> <tr><td>Cr (0 - 0.3)</td><td></td></tr> <tr><td>Ni (0 - 0.3)</td><td></td></tr> <tr><td>P (0 - 0.05)</td><td>0.025</td></tr> <tr><td>S (0 - 0.05)</td><td>0.02</td></tr> <tr><td>V (0 - 0.26)</td><td></td></tr> <tr><td>Cu (0 - 0.28)</td><td></td></tr> </tbody> </table>	Наименование	Сталь 08	C (0.05 - 1.1)	0.087	Si (0 - 1.65)	0.003	Mn (0.03 - 1.55)	0.34	Cr (0 - 0.3)		Ni (0 - 0.3)		P (0 - 0.05)	0.025	S (0 - 0.05)	0.02	V (0 - 0.26)		Cu (0 - 0.28)		12,6	7,7																	
Наименование	Сталь 08																																							
C (0.05 - 1.1)	0.087																																							
Si (0 - 1.65)	0.003																																							
Mn (0.03 - 1.55)	0.34																																							
Cr (0 - 0.3)																																								
Ni (0 - 0.3)																																								
P (0 - 0.05)	0.025																																							
S (0 - 0.05)	0.02																																							
V (0 - 0.26)																																								
Cu (0 - 0.28)																																								
Сталь 55, [6]	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Наименование</th> <th>Сталь 55</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>C (0.05 - 1.1)</td><td>0.55</td></tr> <tr><td>Si (0 - 1.65)</td><td>0.24</td></tr> <tr><td>Mn (0.03 - 1.55)</td><td>0.73</td></tr> <tr><td>Cr (0 - 0.3)</td><td></td></tr> <tr><td>Ni (0 - 0.3)</td><td></td></tr> <tr><td>P (0 - 0.05)</td><td>0.014</td></tr> <tr><td>S (0 - 0.05)</td><td>0.016</td></tr> <tr><td>V (0 - 0.26)</td><td></td></tr> <tr><td>Cu (0 - 0.28)</td><td></td></tr> </tbody> </table>	Наименование	Сталь 55	C (0.05 - 1.1)	0.55	Si (0 - 1.65)	0.24	Mn (0.03 - 1.55)	0.73	Cr (0 - 0.3)		Ni (0 - 0.3)		P (0 - 0.05)	0.014	S (0 - 0.05)	0.016	V (0 - 0.26)		Cu (0 - 0.28)		9,1	3,7																	
Наименование	Сталь 55																																							
C (0.05 - 1.1)	0.55																																							
Si (0 - 1.65)	0.24																																							
Mn (0.03 - 1.55)	0.73																																							
Cr (0 - 0.3)																																								
Ni (0 - 0.3)																																								
P (0 - 0.05)	0.014																																							
S (0 - 0.05)	0.016																																							
V (0 - 0.26)																																								
Cu (0 - 0.28)																																								

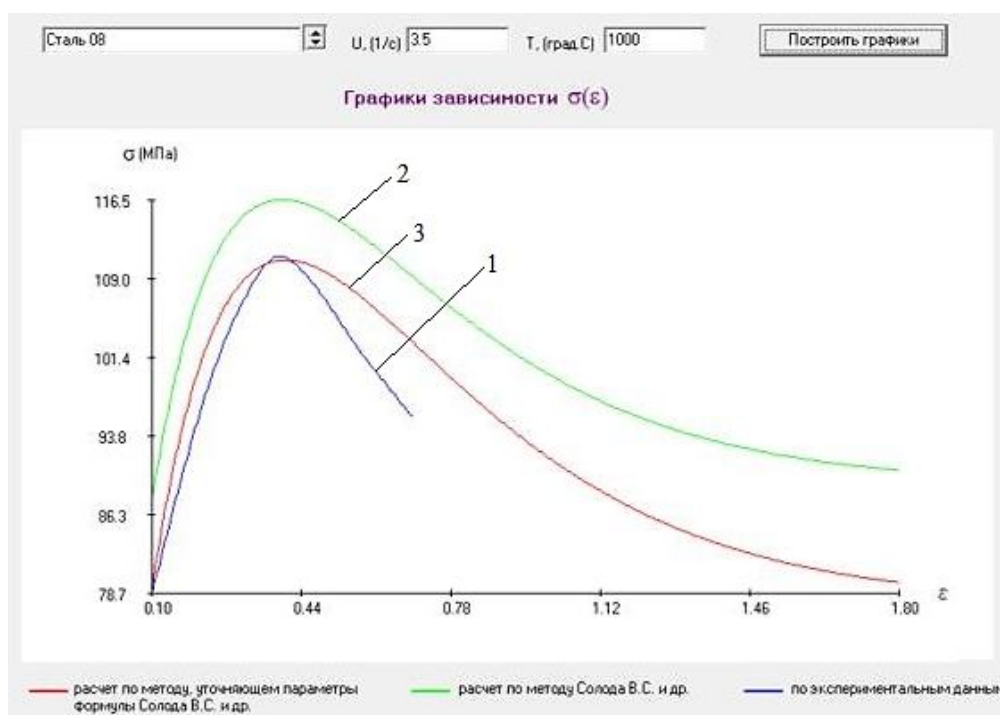


Рисунок 7 Экспериментальные и расчётные кривые напряжения течения стали 08 $\sigma=f(\epsilon)$ при фиксированных значениях U, T

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

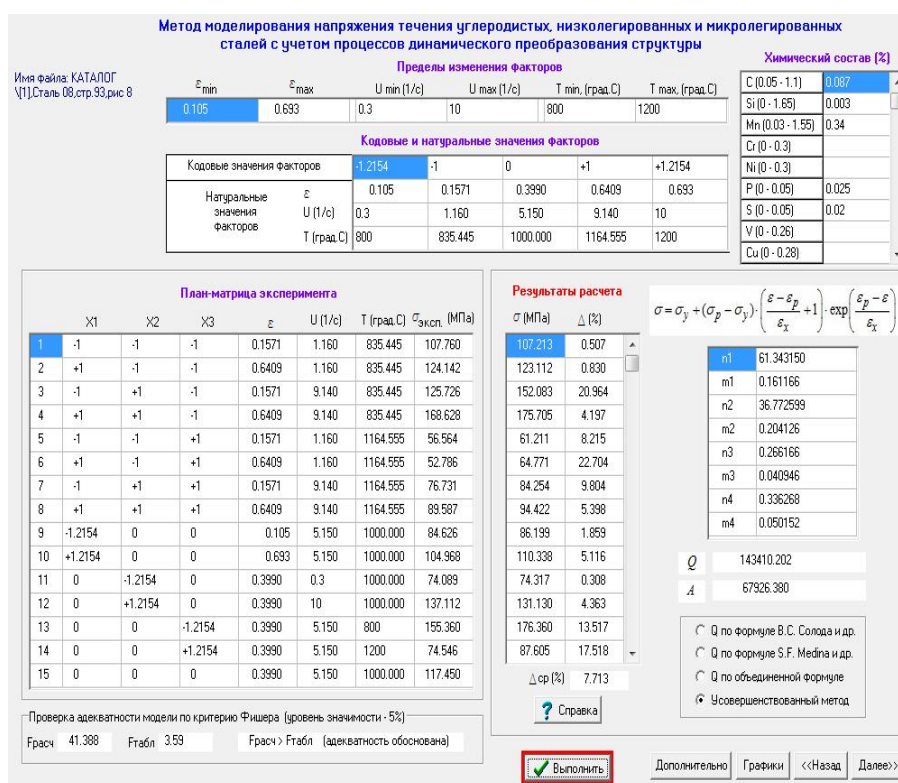


Рисунок 8 Проверка точности аппроксимации экспериментальных данных по стали 08 [6] на базе уточненных констант

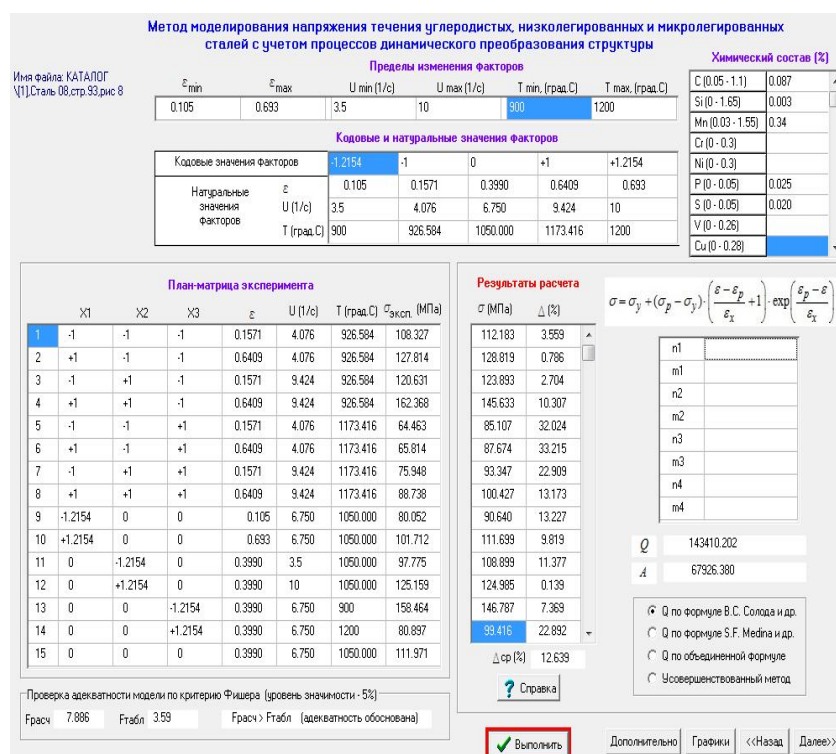


Рисунок 9 Проверка точности аппроксимации экспериментальных данных по стали 08 [6] на базе исходных констант

Таким образом, разработаны усовершенствованные метод и компьютерная программа расчёта уточнённых констант формул, определяющих термокинетические параметры в теории расчета напряжения течения металла с учётом процессов динамического преобразования его структуры при горячей пластической деформации как для отдельных марок сталей, так и для групп (до 25 марок сталей).

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что определение констант, входящих в формулы расчета термокинетических параметров, на базе больших групп марок сталей с широким диапазоном изменения состава химических элементов и с существенно отличающимися типами кривых течения металла не обеспечивает приемлемую точность расчетов напряжения течения металла в процессах горячей пластической деформации. При

этом средние относительные отклонения расчетных значений напряжения течения σ по отношению к экспериментальным в отдельных случаях достигают 30 %.

На базе усовершенствованного метода и компьютерной программы выполнен расчёт уточнённых констант формул, определяющих термокинетические параметры для групп из двух марок сталей: 0,5C—0,2Si—0,68Mn, 0,06C—0,12Si—0,42Mn и трёх марок сталей: 45, 08, 55. При этом средние относительные отклонения расчетных значений напряжения течения металла по отношению к экспериментальным составили 4–10 %.

В дальнейшем наиболее целесообразно определение уточнённых констант, входящих в формулы расчета термокинетических параметров, на базе экспериментальных данных для отдельных марок сталей или для небольших групп марок сталей с подобными типами кривых течения металла.

Библиографический список

1. Яковченко, А. В. Метод уточнения констант, определяющих термокинетические параметры в формуле расчета напряжения течения металла [Текст] / А. В. Яковченко, П. Н. Денищенко, С. И. Кравцова, Н. И. Ивлева // Сборник научных трудов ДонГТИ. — 2022. — № 26 (69). — Алчевск : ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ». — С. 29–39.
2. Солод, В. С. Математическое моделирование сопротивления деформации при горячей прокатке углеродистых сталей [Текст] / В. С. Солод, Я. Е. Бейгельзимер, Р. Ю. Кулагин // Металл и литье Украины. — 2006. — № 7–8. — С. 52–56.
3. Saadatkia, S. Hot deformation behavior, dynamic recrystallization, and physically-based constitutive modeling of plain carbon steels [Text] / S. Saadatkia, H. Mirzadeha, J.-M. Cabrera // Materials Science and Engineering: A. — 2015. — Vol. 636. — P. 196–202.
4. Яковченко, А. В. Методы компьютерного моделирования напряжения течения металла в процессах горячей пластической деформации [Текст] : учеб. пособ. / А. В. Яковченко, С. А. Снитко, Н. И. Ивлева. — Донецк : ДонНТУ, 2018. — 197 с.
5. Yanagida, A. A novel approach to determine the kinetics for dynamic recrystallization by using the flow curve [Text] / A. Yanagida, J. Yanagimoto // Journal of Materials Processing Technology. — 2004. — Vol. 151. — Iss. 1–3. — P. 33–38.
6. Полухин, П. И. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов [Текст] : справочник / П. И. Полухин, Г. Я. Гун, А. М. Галкин. — М. : Металлургия, 1976. — 488 с.
7. Зависимость напряжения течения стали 0,19C—0,20Si—0,40Mn, учитывающая при горячей прокатке процессы динамического преобразования структуры [Текст] / А. В. Яковченко, С. А. Снитко, В. В. Пилипенко, Н. И. Ивлева // Вестник Донецкого национального технического университета. — 2020. — Том 19. — № 1. — С. 45–52.

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

Рекомендована к печати к.т.н., доц. МЧМ ДонГТИ Должиковым В. В., к.т.н., помощником нач. СПЦ № 1 АМК ООО «ЮГМК» по технологии Чичканом А. А.

Статья поступила в редакцию 19.05.2022.

Doctor of Technical Sciences Yakovchenko A. V., PhD in Engineering Denishchenko P. N., Kravtsova S. I. (*DonSTI, Alchevsk, LPR, kravtsosveta@gmail.com*), **Ivleva N. I.** (*DonNIIchermet, Donetsk, DPR, ivl22@mail.ru*)

IMPROVED METHOD AND SOFTWARE PROGRAM FOR DETERMINING THE REFINED CONSTANTS OF FORMULAS FOR CALCULATING THERMOKINETIC PARAMETERS FOR GROUPS OF STEEL GRADES

An improved method and a software program for calculating the refined constants of formulas that determine the thermokinetic parameters in the theory of calculating the metal flow stress, considering the processes of dynamic transformation of its structure during hot plastic deformation, both for individual steel grades and for groups (up to 25 steel grades). The calculation of the refined constants of formulas determining the thermokinetic parameters for groups of two steel grades: 0,5 S—0,2Si—0,68Mn, 0,06S—0,12Si—0,42Mn and three steel grades: 45, 08, 55. At the same time, the average relative deviations of the calculated values of metal flow stress in relation to the experimental ones were 4–10 %.

Key words: *metal flow stress under hot plastic deformation, constants determining thermokinetic parameters, computer database of digital information about experimental metal flow stress curves, spline-interpolation of flow curves, software program.*