

УДК 621.771.23(075.8)

д.т.н. Яковченко А. В.,
к.т.н. Денищенко П. Н.,
Кравцова С. И.
(ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР),
Ивлева Н. И.
(ДонНИИчермет, г. Донецк, ДНР)

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ТЕЧЕНИЯ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ И МИКРОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ ПРИ ГОРЯЧЕЙ ДЕФОРМАЦИИ

Разработана специализированная компьютерная программа автоматизированного моделирования напряжения течения низколегированных и микролегированных сталей на базе объединенной формулы расчёта величины энергии активации деформации. Для более чем 50-ти марок сталей, в том числе низко- и микролегированных, определены значения величины энергии активации деформации. Разработанная компьютерная программа обеспечивает определение напряжения течения при заданных значениях накопленной деформации, скорости деформации и температуры металла. С использованием метода планируемого эксперимента определено влияние микролегирующих элементов V, Mo, Ti, Nb на напряжение течения.

Ключевые слова: автоматизированное моделирование напряжения течения низколегированных и микролегированных сталей, динамическое преобразование структуры, экспериментальные кривые течения, сплайн-интерполяция, теория планируемого эксперимента.

Определение напряжения течения металла основывается на экспериментальной информации, например, [1, 2 и др.]. На практике широко используются методы В. И. Зюзина [2], В. А. Николаева [3], Л. В. Андреюка [4] и др. Вместе с тем при создании этих методов использовалась экспериментальная информация, в которой степень деформации не превышала значения 0,3–0,5. При больших значениях деформации используется понятие суммарной относительной или логарифмической деформации, которая в указанной экспериментальной информации не превышала соответственно значения 0,4–0,7. При разработке рациональных технологических процессов горячей прокатки важными вопросами являются расчеты энергосиловых параметров и деформированного состояния металла, в которых напряжение течения металла оказывает существенное влияние на результаты. В ряде технологических процессов актуально учитывать накопленную деформацию, которая может

существенно превышать указанные выше значения, достигая единицы и более. Это возможно реализовать, например, на базе метода [5], который позволяет учитывать накопленную деформацию в рассматриваемой точке очага, а также процессы динамического преобразования структуры металла в процессе его горячей прокатки.

В работе поставлена задача автоматизированного моделирования напряжения течения низколегированных и микролегированных сталей на базе метода [5], который учитывает химический состав сталей, температуру, скорость деформации, накопленную деформацию в рассматриваемой точке очага, а также процессы динамического преобразования структуры металла в процессе его горячей прокатки. Планируется также выполнить проверку адекватности метода и изучить влияние микролегирования на напряжение течения этих сталей.

В работе [6] создана специализированная компьютерная программа расчета на-

пряжения течения металла σ на базе математической модели [5], учитывающей химический состав углеродистой стали, температуру T , скорость U и накопленную деформацию ε , а также процессы динамического преобразования структуры при горячей деформации.

Основные формулы модели показаны в фрагменте окна программы (рис. 1). Здесь 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 . Влияние химического состава стали отражается величиной энергии активации деформации Q ($\text{кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$), которая входит в комплексный температурно-скоростной параметр процесса деформации (параметр Зинера — Холломона (z)); A — скоростная константа деформируемого материала.

Математическую модель [5] в настоящей работе дополнили слагаемым δQ , полученным в работе [7], которое учитывает влияние на величину энергии активации деформации следующих химических элементов: Mo , Ti , Nb (см. фрагмент окна программы на рисунке 2).

Выполним анализ полученной объединенной формулы расчета величины энергии активации деформации применительно к моделированию напряжения течения низколегированных и микролегированных сталей при горячей деформации.

Для этого воспользуемся компьютерной программой, созданной в работе [8], которая на первом этапе в автоматизированном режиме формирует план-матрицу эксперимента, обеспечивающую научно-обоснованный выбор наиболее рациональных точек в области изменения факторов ε , U , T , а на следующем — определяет соответствующие экспериментальные $\sigma_{\text{экс}}$

значения. Метод автоматизированного определения экспериментальных значений напряжения течения металла σ в зависимости от фиксированных значений степени деформации ε , скорости деформации U и температуры T основан на использовании компьютерной базы соответствующей цифровой информации [8].

На рисунке 3 показано окно компьютерной программы автоматизированного моделирования напряжения течения низколегированных и микролегированных сталей при горячей пластической деформации. Расчёты выполнены для хромомолибденовой стали, по которой в работе [1] представлены экспериментальные данные по кривым течения. Химический состав стали указан в правом верхнем углу окна программы (рис. 3).

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

$$\text{где } \sigma_p = 72,06 \cdot (Z/A)^{0,131}, \quad \sigma_y = 51,66 \cdot (Z/A)^{0,149},$$

$$\varepsilon_x = 0,193 \cdot (Z/A)^{0,112}, \quad \varepsilon_p = 0,268 \cdot (Z/A)^{0,107}.$$

$$Z = U \cdot \exp[Q/(R \cdot T)],$$

где $R = 8,318 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ - газовая постоянная; T - абсолютная температура.

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

а

$$Q = 308700 + 37100 \cdot \ln(C\%) + 10900 \cdot \ln(C\%)^2 + 27000 \cdot (Si\%) + 8100 \cdot (Mn\%) + 337100 \cdot (Cr\%) + 249900 \cdot (Ni\%) - 119000 \cdot (Cu\%) + 181000 \cdot (V\%) - 288000 \cdot (P\%) - 855000 \cdot (S\%)$$

б

Рисунок 1 Фрагмент окна программы: а — основные формулы математической модели [2]; б — формула расчета величины Q [2]

$$\delta Q = 35651,28 \cdot (Mo\%) + 93680,52 \cdot (Ti\%)^{0,2919} + 70729,85 \cdot (Nb\%)^{0,5649}$$

Рисунок 2 Формула, учитывающая влияние на величину энергии активации деформации следующих химических элементов:

$$Mo, Ti, Nb [7]$$

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Имя файла: КАТАЛОГ\3.
(молИд: 0.49\Сталь типа
хромоникобаненовой,стр.88,рис.
II, 62-63)

Пределы изменения факторов

ε_{\min}	ε_{\max}	U min (1/с)	U max (1/с)	T min, (град.С)	T max, (град.С)
0.051	0.511	1	100	900	1200

Химический состав (%)

Mo	0.49
Ti	
Nb	
C (0.05 - 1.1)	0.26
Si (0 - 1.65)	0.35
Mn (0.03 - 1.55)	0.57
Cr (0 - 0.3)	0.03
Ni (0 - 0.3)	0.29
P (0 - 0.05)	0.023

Кодовые и натуральные значения факторов

Кодовые значения факторов	-1, 2154	-1	0	+1	+1, 2154
Натуральные значения факторов	ε	U (1/с)	T (град.С)		
	0.051	0.0918	0.2810	0.4702	0.511
	1	9.773	50.500	91.227	100
	900	926.584	1050.000	1173.416	1200

План-матрица эксперимента

	X1	X2	X3	ε	U (1/с)	T (град.С)	$\sigma_{\text{экс}}$ (МПа)
1	-1	-1	-1	0.0918	9.773	926.584	133.678
2	+1	-1	-1	0.4702	9.773	926.584	181.515
3	-1	+1	-1	0.0918	91.227	926.584	179.514
4	+1	+1	-1	0.4702	91.227	926.584	243.751
5	-1	-1	+1	0.0918	9.773	1173.416	70.004
6	+1	-1	+1	0.4702	9.773	1173.416	95.053
7	-1	+1	+1	0.0918	91.227	1173.416	94.005
8	+1	+1	+1	0.4702	91.227	1173.416	127.643
9	-1.2154	0	0	0.051	50.500	1050.000	96.197
10	+1.2154	0	0	0.511	50.500	1050.000	157.793
11	0	-1.2154	0	0.2810	1	1050.000	103.116
12	0	+1.2154	0	0.2810	100	1050.000	162.054
13	0	0	-1.2154	0.2810	50.500	900	230.396
14	0	0	+1.2154	0.2810	50.500	1200	104.077
15	0	0	0	0.2810	50.500	1050.000	147.536

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 (%)
138.435	3.559
184.665	1.735
192.860	7.434
243.229	0.214
66.881	4.461
85.679	9.862
87.395	7.031
118.621	7.068
100.378	4.347
154.104	2.338
91.677	11.094
158.153	2.407
231.627	0.534
102.003	1.993
$\Delta \sigma$ (%)	4.343

Z/A

	1	2	3
σ_y	151.895	151.895	211.879
σ_p	185.995	185.995	249.220
ε_p	0.581	0.581	0.738
ε_x	0.434	0.434	0.558

Q 329158.489
 A 1489220392120.064

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

Проверка адекватности модели по критерию Фишера (уровень значимости - 5%)
Грасс 244.481 Гтабл 3.59 Грасс > Гтабл (адекватность обоснована)

 Дополнительно Графики <<Назад Далее>>

Рисунок 3 Окно усовершенствованной компьютерной программы по проверке адекватности модели на базе объединенной формулы расчёта величины энергии активации деформации по отношению к экспериментальным данным

С применением центрального композиционного ортогонального планирования разработан план-матрица [9] в виде, представленном на рисунке 3. Здесь в верхней части окна указаны пределы изменения факторов ε , U , T . Ниже формируется таблица кодовых и натуральных значений факторов.

План-матрица содержит 15 строк (опытов) для определения величин σ при указанных в них сочетаниях значений факторов ε , U , T . Последняя колонка план-матрицы содержит значения напряжения течения металла $\sigma_{\text{экс}}$, которые определены по методу [8] с использованием компьютерной базы цифровой экспериментальной информации для выбранной стали.

Выполнена разработка функции компьютерной программы определения соответствующих расчетных значений $\sigma_{\text{расч}}$ для каждого из 15-ти опытов на основе объединенной формулы.

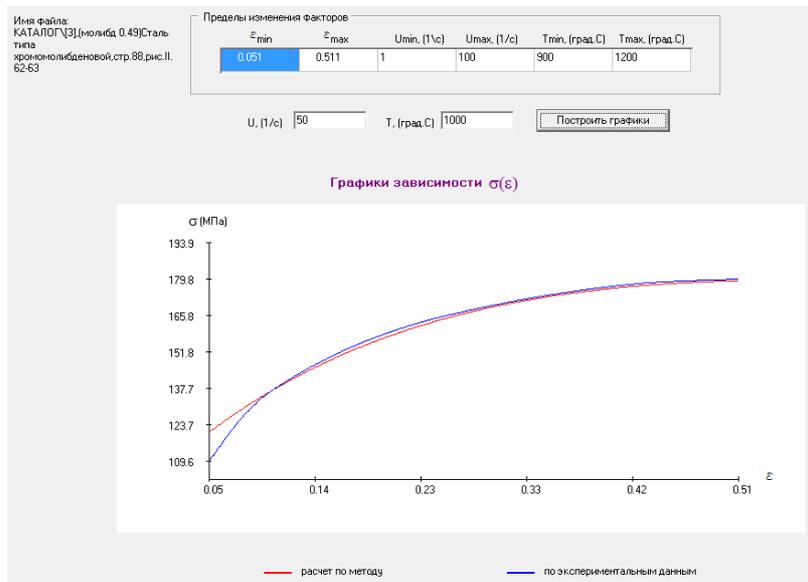
Определена средняя относительная погрешность по всему планируемому эксперименту для указанной стали, которая составила 4,3 %.

Проверка адекватности модели с помощью критерия Фишера также реализована в компьютерной программе, окно которой показано на рисунке 3. Указанная проверка дала удовлетворительный результат.

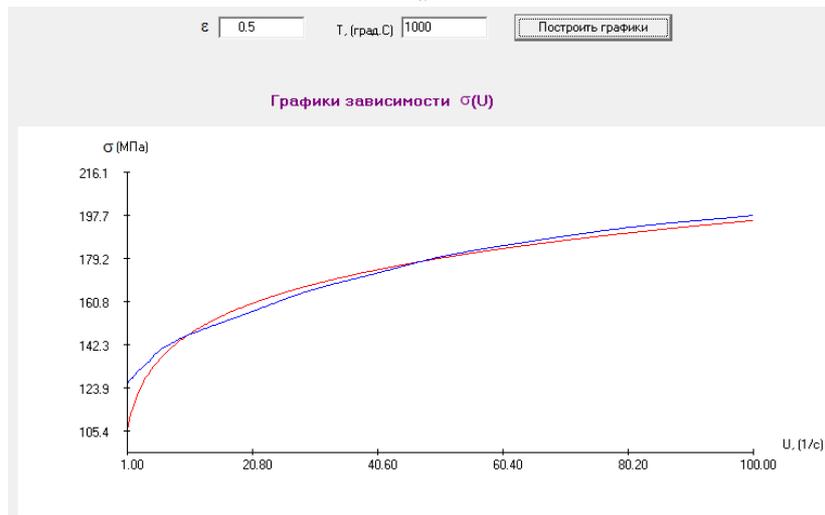
Предусмотрена функция компьютерной программы расчета и построения графических зависимостей напряжения течения металла ($\sigma_{\text{расч}}$ и $\sigma_{\text{экс}}$) от каждого из трёх факторов ε , U , T . Результаты, представленные на рисунке 4, позволяют сделать вывод о том, что кривые, построенные по расчетным данным (показаны красным цветом), адекватно описывают экспериментальные кривые течения (показаны синим цветом).

Полученные выше результаты позволяют использовать предложенную объединенную формулу расчета величины энергии активации деформации применительно к моделированию напряжения течения низколегированных и микрولةгированных сталей при горячей деформации, в том числе для выполнения конечно-элементного моделирования этих процессов.

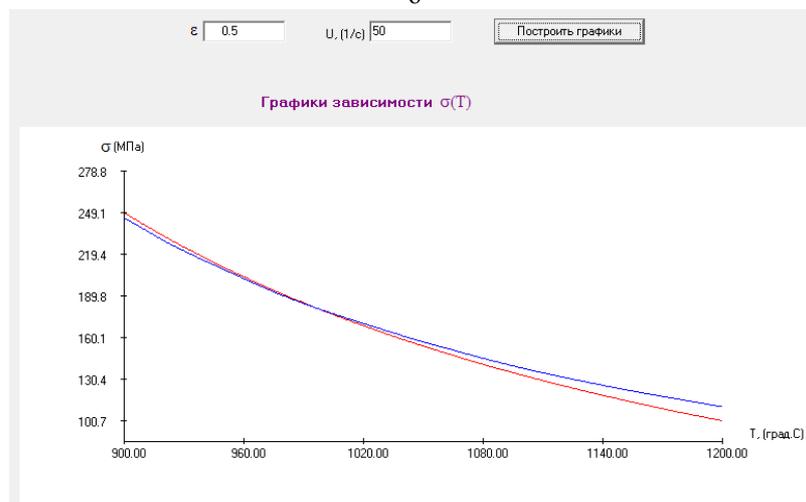
МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ



а



б



в

Рисунок 4 Графические зависимости напряжения течения металла σ от ϵ (а), U (б), T (в)

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

В таблицах 1–7 представлены, полученные на базе объединенной формулы (рис. 5) значения величины энергии активации деформации Q для ряда низколегированных и микролегированных сталей. Значения Q в таблицах 1–7 определены по указанным в них массовым долям элементов. С использованием этих значений Q напряжение течения σ рассчитывается по математической модели, представленной на рисунке 1, а.

При микролегировании введенный элемент имеет возможность образования соединений с другими элементами, находящимися в твердом растворе. Известно, что

при введении малых добавок, остаточное содержание которых не превышает 0,1 %, имеет место комплексное воздействие на сталь, при этом значительно повышаются её механические свойства в холодном состоянии [10].

$$Q = 308700 + 37100 \cdot \ln(C\%) + 10900 \cdot \ln(C\%)^2 + 27000 \cdot (Si\%) + 8100 \cdot (Mn\%) + 337100 \cdot (Cr\%) + 249900 \cdot (Ni\%) - 119000 \cdot (Cu\%) + 181000 \cdot (V\%) + 35651.28(Mo\%) + 93680.52(Ti\%)^{0.5919} + 70729.85(Nb\%)^{0.5669} - 288000 \cdot (P\%) - 855000 \cdot (S\%)$$

Рисунок 5 Фрагмент окна программы — объединенная формула расчета величины энергии активации деформации Q , полученная на базе моделей [5], [7]

Таблица 1

Значения величины энергии активации деформации для сталей по ГОСТ 1050–2013

Металлопродукция из нелегированных конструкционных качественных и специальных сталей, ГОСТ 1050–2013									Q , кДж · моль ⁻¹
Марка стали	Массовая доля элементов, %								
	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	
08кп	0,12	0,50	0,03	0,035	0,030	0,10	0,30	0,25	229041,5
08пс	0,11	0,65	0,17	0,035	0,030	0,10	0,30	0,25	228911,5
10кп	0,14	0,50	0,07	0,035	0,030	0,15	0,30	0,25	256056,0
10пс	0,14	0,65	0,17	0,035	0,030	0,15	0,30	0,25	259971,0
20кп	0,24	0,50	0,07	0,035	0,030	0,25	0,30	0,25	321512,8
20пс	0,24	0,65	0,17	0,035	0,030	0,25	0,30	0,25	325427,8
20	0,24	0,65	0,37	0,035	0,030	0,25	0,30	0,25	330827,8
30	0,35	0,80	0,37	0,035	0,030	0,25	0,30	0,25	354265,5
40	0,45	0,80	0,37	0,035	0,030	0,25	0,30	0,25	369067,9
45	0,50	0,80	0,37	0,035	0,030	0,25	0,30	0,25	375273,6
50	0,55	0,80	0,37	0,035	0,030	0,25	0,30	0,25	380887,4
60	0,65	0,80	0,37	0,035	0,030	0,25	0,30	0,25	390726,9
15Г	0,19	1,00	0,37	0,035	0,030	0,30	0,30	0,25	336757,9
20Г	0,24	1,00	0,37	0,035	0,030	0,30	0,30	0,25	350517,8
25Г	0,30	1,00	0,37	0,035	0,030	0,30	0,30	0,25	363661,0
30Г	0,35	1,00	0,37	0,035	0,030	0,30	0,30	0,25	372740,5
35Г	0,40	1,00	0,37	0,035	0,030	0,30	0,30	0,25	380605,5
40Г	0,45	1,00	0,37	0,035	0,030	0,30	0,30	0,25	387542,9
45Г	0,50	1,00	0,37	0,035	0,030	0,30	0,30	0,25	393748,6
50Г	0,56	1,00	0,37	0,035	0,030	0,30	0,30	0,25	400423,7
10Г2	0,15	1,55	0,37	0,035	0,030	0,30	0,30	0,25	327289,6
30Г2	0,35	1,55	0,37	0,035	0,030	0,30	0,30	0,25	377195,5
35Г2	0,39	1,55	0,37	0,035	0,030	0,30	0,30	0,25	383569,3
40Г2	0,44	1,55	0,37	0,035	0,030	0,30	0,30	0,25	390674,2
45Г2	0,49	1,55	0,37	0,035	0,030	0,30	0,30	0,25	397013,7
50Г2	0,55	1,55	0,37	0,035	0,030	0,30	0,30	0,25	403817,4

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Таблица 2

Значения величины энергии активации деформации для сталей по ГОСТ 14959–2016

Металлопродукция из рессорно-пружинной нелегированной и легированной стали, ГОСТ 14959–2016										$Q,$ $кДж \cdot моль^{-1}$
Марка стали	Массовая доля элементов, %									
	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	V	Cu	
65	0,70	0,80	0,37	0,035	0,035	0,25	0,25		0,20	387106,8
85	0,90	0,80	0,37	0,035	0,035	0,25	0,25		0,20	401909,3
70Г	0,75	1,20	0,37	0,035	0,035	0,25	0,25		0,20	394410,5
80Г	0,85	1,20	0,37	0,035	0,035	0,25	0,25		0,20	401782,6
40С2А	0,42	0,80	1,65	0,035	0,035	0,15	0,20		0,20	345374,2
55С2А	0,58	0,90	1,65	0,035	0,035	0,30	0,25		0,20	428255,6
55С2ГФ	0,60	1,25	1,65	0,035	0,035	0,30	0,25	0,15	0,20	460237,4
60С2	0,65	0,90	1,65	0,035	0,035	0,30	0,25		0,20	434966,9
70С2ХА	0,75	0,60	1,65	0,035	0,035	0,30	0,25		0,20	440965,5

Таблица 3

Значения величины энергии активации деформации для сталей по ГОСТ 5520–2017

Прокат толстолистовой из нелегированной и легированной стали для котлов и сосудов, работающих под давлением, ГОСТ 5520–2017											$Q,$ $кДж \cdot моль^{-1}$
Марка стали	Массовая доля элементов, %										
	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Mo	V	Cu	
15К	0,20	0,65	0,30	0,025	0,035	0,30	0,30	0,08	0,05	0,25	354066,2
16К	0,20	0,75	0,37	0,025	0,035	0,30	0,30	0,08	0,05	0,25	356766,2
18К	0,22	0,85	0,37	0,025	0,035	0,30	0,30	0,08	0,05	0,25	363190,0
20К	0,24	0,65	0,30	0,025	0,035	0,30	0,30	0,08	0,05	0,25	364804,9
22К	0,26	1,00	0,40	0,025	0,035	0,30	0,30	0,08	0,05	0,25	375054,5
16ГС	0,18	1,20	0,70	0,025	0,035	0,30	0,30	0,08	0,05	0,25	363115,5
10Г2С1	0,12	1,55	1,10	0,025	0,035	0,30	0,30	0,08	0,05	0,25	352868,6
17ГС	0,20	1,40	0,60	0,025	0,035	0,30	0,30	0,08	0,05	0,25	368241,2
17Г1С	0,20	1,55	0,60	0,025	0,035	0,30	0,30	0,08	0,05	0,25	369456,2
09Г2С	0,12	1,55	0,80	0,025	0,035	0,30	0,30	0,08	0,05	0,25	344768,6
10Г2С1	0,12	1,55	1,10	0,025	0,035	0,30	0,30	0,08	0,05	0,25	352868,6

Таблица 4

Значения величины энергии активации деформации для сталей по ГОСТ 4728–2010

Заготовки осевые для железнодорожного подвижного состава, ГОСТ 4728–2010										$Q,$ $кДж \cdot моль^{-1}$
Марка стали	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu		
ОС	0,50	0,90	0,35	0,035	0,035	0,30	0,30	0,25		390958,6

Таблица 5

Значения величины энергии активации деформации для сталей по ГОСТ 4543–2016

Металлопродукция из конструкционной легированной стали, ГОСТ 4543–2016										$Q,$ $кДж \cdot моль^{-1}$
Марка стали	Массовая доля элементов, %									
	C	Mn	Si	S	P	Cr	V	Ti	Mo	
40ГМФР	0,44	1,2	0,37	0,035	0,035	0,3	0,1	0,045	0,16	350178,1

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Таблица 6

Значения величины энергии активации деформации для сталей по ГОСТ 6713–91

Прокат низколегированный конструкционный для мостостроения, ГОСТ 6713–91									Q, кДж · моль ⁻¹
Марка стали	Массовая доля элементов, %								
	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	
16Д	0,18	0,70	0,25	0,04	0,035	0,30	0,30	0,2	328138,4

Таблица 7

Значения величины энергии активации деформации для сталей по ГОСТ 5521–93

Прокат стальной для судостроения, ГОСТ 5521-93													Q, кДж · моль ⁻¹
Марка стали	Массовая доля элементов, %												
	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	V	Ti	Mo	Nb	
A	0,21	1,00	0,35	0,04	0,04	0,30	0,30	0,25	-	-	-	-	334957,8
A32	0,18	1,55	0,50	0,03	0,03	0,20	0,30	0,25	0,10	0,02	0,08	0,05	349609,3
A40	0,18	1,55	0,50	0,03	0,03	0,20	0,30	0,25	0,10			0,05	337509,6

Влияние микролегирования на напряжение течения металла при его горячей пластической деформации изучено недостаточно. С этой целью разработана новая компьютерная программа, представленная на рисунке 6. В верхней части окна задаются пределы изменения факторов ε , U , T . В правом верхнем углу окна указываются массовые доли химических элементов исследуемой стали.

Аналогично окну программы, показанному на рисунке 3, автоматически формируется план-матрица с кодовыми и натуральными значениями факторов. В средней части окна предусмотрены результаты расчётов напряжения течения металла σ по объединённой формуле (рис. 5). Параллельно предусмотрена дополнительная функция. Так, в правом верхнем углу окна напротив одного или нескольких химических элементов можно указать, что их содержание в стали равно нулю. Например, на рисунке 6 напротив микролегирующих элементов V , Mo , Ti , Nb указано, что их содержание в стали равно нулю. Результаты соответствующих расчётов напряжения течения металла σ_0 предусмотрены в последней колонке план-матрицы. Рядом с колонкой σ предусмотрена колонка Δ — относительное отклонение σ_0 по отношению к σ .

В окне программы (см. рис. 6) на примере стали А32, представленной в таблице 7, установлено, что наличие микролегирующих элементов V , Mo , Ti , Nb с указанными их массовыми долями приводит к увеличению (на 6,5 %) напряжения течения σ .

Также установлено, что увеличение массовой доли каждого из микролегирующих элементов V , Mo , Ti , Nb до 0,1 % приводит к увеличению напряжения течения σ до 10 %.

Предусмотрена также функция компьютерной программы построения графических зависимостей, представленных на рисунках 7–9.

Таким образом, на базе объединённой формулы (рис. 5) реализована возможность в автоматизированном режиме выполнять расчёты напряжения течения низколегированных и микролегированных сталей при горячей деформации, в том числе когда накопленная деформация ε достигает единицы и более.

Установлена возможность практического использования объединённой формулы расчёта величины энергии активации деформации для ряда низколегированных и микролегированных сталей, на базе которой выполняется определение напряжения их течения при горячей пластической деформации.

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Автоматизированное моделирование напряжения течения низколегированных и микролегированных сталей с учетом процессов динамического преобразования структуры

Марка стали: A32 Прокат стальной для судостроения, ГОСТ 5521-93

Пределы изменения факторов

ϵ_{min}	ϵ_{max}	U min (1/c)	U max (1/c)	T min, (град.С)	T max, (град.С)
0.01	1.2	1	100	900	1200

Химический состав (%)
коррект. для σ_0

Cr (0 - 0.3)	0.2
Ni (0 - 0.3)	0.3
P (0 - 0.05)	0.035
S (0 - 0.05)	0.035
V (0 - 0.26)	0.1
Cu (0 - 0.28)	0.25
Mo	0.08
Ti	0.02
Nb	0.05

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)		
	0.01	1	900		
	0.1154	9.773	926.584		
	0.6050	50.500	1050.000		
	1.0946	91.227	1173.416		
	1.2	100	1173.416		

План-матрица эксперимента

	X1	X2	X3	ϵ	U (1/c)	T (град.С)	σ_0 (МПа)
1	-1	-1	-1	0.1154	9.773	926.584	140.490
2	+1	-1	-1	1.0946	9.773	926.584	169.076
3	-1	+1	-1	0.1154	91.227	926.584	192.486
4	+1	+1	-1	1.0946	91.227	926.584	236.882
5	-1	-1	+1	0.1154	9.773	1173.416	73.930
6	+1	-1	+1	1.0946	9.773	1173.416	71.285
7	-1	+1	+1	0.1154	91.227	1173.416	95.564
8	+1	+1	+1	1.0946	91.227	1173.416	103.625
9	-1.2154	0	0	0.01	50.500	1050.000	84.727
10	+1.2154	0	0	1.2	50.500	1050.000	136.397
11	0	-1.2154	0	0.6050	1	1050.000	84.518
12	0	+1.2154	0	0.6050	100	1050.000	168.188
13	0	0	-1.2154	0.6050	50.500	900	244.684
14	0	0	+1.2154	0.6050	50.500	1200	100.648
15	0	0	0	0.6050	50.500	1050.000	153.108

Результаты расчета

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

σ (МПа)	Δ (%)
148.362	5.603
179.900	6.402
204.050	6.008
250.888	5.912
71.229	3.654
67.362	5.503
91.752	3.989
97.880	5.544
84.634	0.110
136.272	0.092
84.441	0.092
168.060	0.076
260.494	6.461
94.381	6.226

Z / A	1	2	3
σ_y	1680.503	1680.503	15686.818
σ_p	156.223	156.223	217.916
ϵ_p	190.646	190.646	255.452
ϵ_x	0.593	0.593	0.753
ϵ_x	0.443	0.443	0.569

Q: 349609.270
A: 9576132056043.715

Q по формуле В.С. Слода и др.
 Q по формуле S.F. Медина и др.
 Q по объединенной формуле

Выполнить Графики <<Назад Далее>>

Рисунок 6 Окно усовершенствованной компьютерной программы по определению влияния массовой доли химических элементов на напряжение течения металла (расчёты выполнены на примере стали А32, таблица 7)

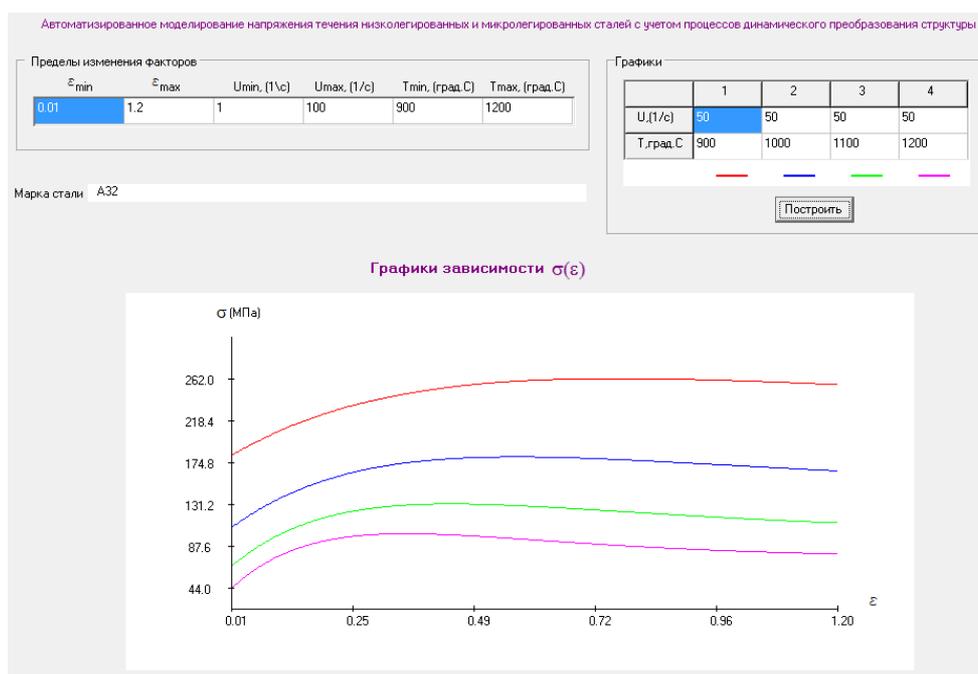


Рисунок 7 Графические зависимости напряжения течения стали А32 от накопленной деформации

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

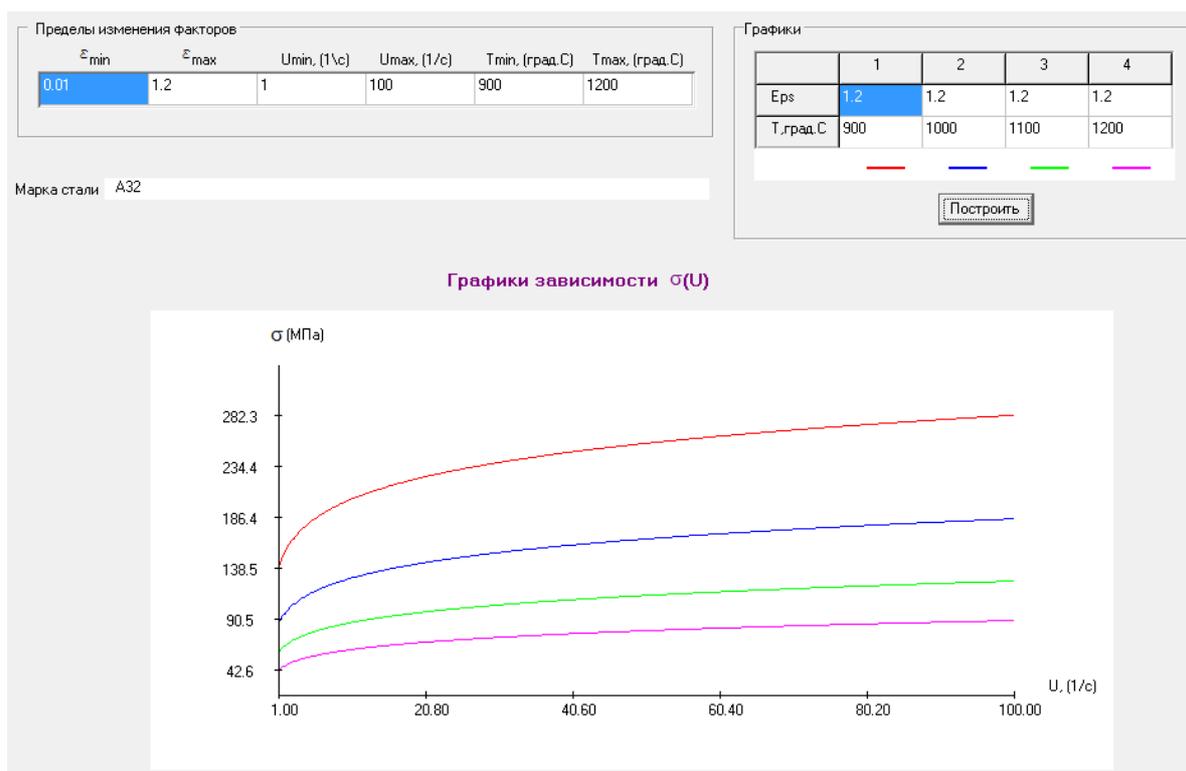


Рисунок 8 Графические зависимости напряжения течения стали A32 от скорости деформации

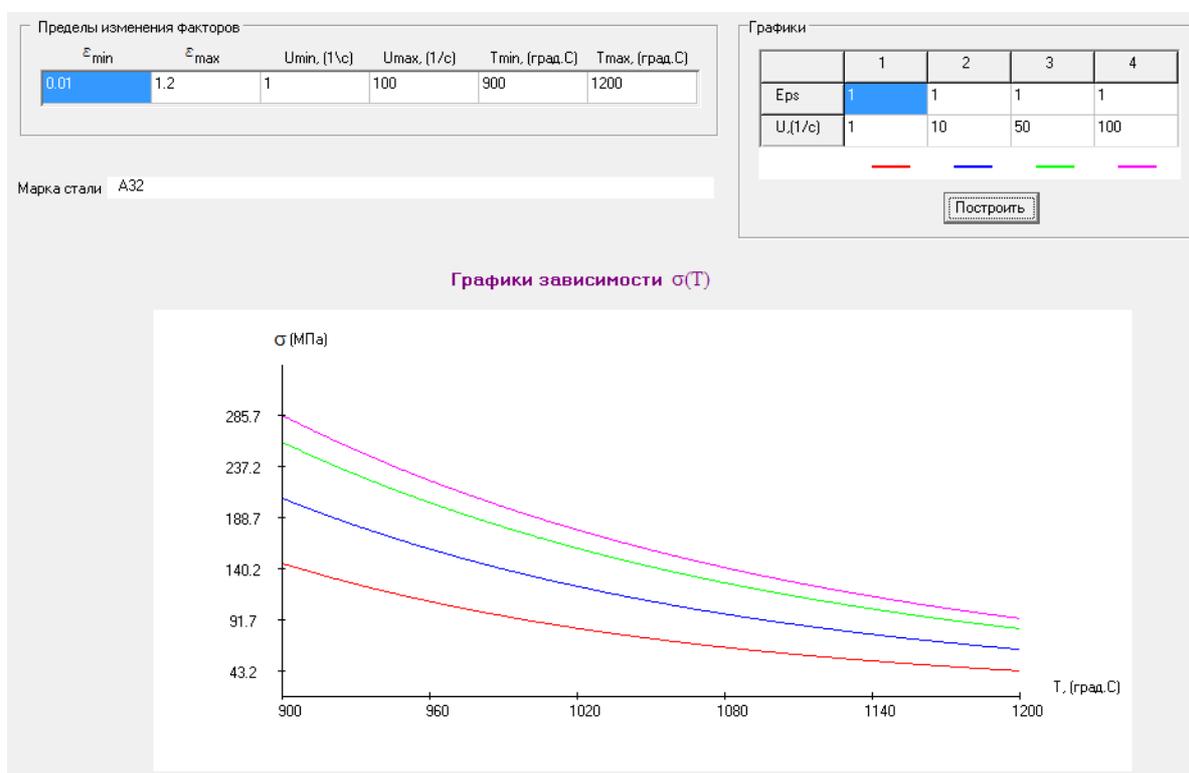


Рисунок 9 Графические зависимости напряжения течения стали A32 от температуры

Для более чем 50-ти марок сталей, в том числе низко- и микролегированных, определены значения величины энергии активации деформации. Разработанная специализированная компьютерная программа обеспечивает определение напряжения течения при заданных значениях накопленной деформации, скорости деформации и температуры металла.

Разработанная компьютерная программа подтвердила адекватность объединенной формулы, а также с использованием метода

планируемого эксперимента позволила установить, что увеличение массовой доли каждого из микролегирующих элементов V , Mo , Ti , Nb до 0,1 % приводит к увеличению напряжения течения σ до 10 %.

Перспективным направлением дальнейших исследования является разработка формул расчёта величины энергии активации деформации для легированных сталей и жаропрочных сплавов.

Библиографический список

1. Теория прокатки [Текст] : справочник / А. И. Целиков [и др.]. — М. : Металлургия, 1982. — 335 с.
2. 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.
3. Николаев, В. А. Теория и практика процессов прокатки [Текст] : учеб. пособ. / В. А. Николаев. — Запорожье : ЗГИА, 2002. — 232 с.
4. Андреюк, Л. В. Аналитическая зависимость сопротивления деформации сталей и сплавов от их химического состава [Текст] / Л. В. Андреюк, Г. Г. Тюленев, Б. С. Прицкер // Сталь. — 1972. — № 6. — С. 522–523.
5. 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.
6. 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.
7. Medina, S. F. General Expression of the Zener — Hollomon Parameter as a Function of the Chemical Composition of Low Alloy and Microalloyed Steels [Text] / S. F. Medina, C. A. Hernandez // Acta Mater. — 1996. — Vol. 44. — No. 1. — P. 137–148.
8. 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.
9. Винарский, М. С. Планирование эксперимента в технологических исследованиях [Текст] : учеб. пособ. / М. С. Винарский, М. В. Лурье. — К. : Техника, 1975. — 168 с.
10. Браун, В. С. Микролегирование стали [Текст] / В. С. Браун. — К. : Наук. думка, 1982. — 303 с.

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

Рекомендована к печати к.т.н., доц. каф. МЧМ ДонГТИ Должиковым В. В.,
 д.т.н., доц., зав. каф. ОМД ДонНТУ Снитко С. А.

Статья поступила в редакцию 11.06.2021.

**Doctor of Technical Sciences Yakovchenko A. V., PhD in Engineering Denishchenko P. N.,
Kravtsova S. I. (DonSTI, Alchevsk, LPR), Ivleva N. I. (DonNIICherMet, Donetsk, DPR, mond1991@mail.ru)**
**AUTOMATED SIMULATION OF THE FLOW STRESS OF LOW-ALLOY
AND MICRO-ALLOY STEELS UNDER HOT DEFORMATION**

The work is devoted to the development of a specialized software application for automated modeling of the flow stress of low-alloy and micro-alloy steels based on a combined formula for calculating the value of the strain activation energy, which will allow determining the flow stress at given values of cumulative deformation, strain rate and metal temperature. Utilize the method of the planned experiment, the influence of micro-alloying elements V, Mo, Ti, Nb was determined for the flow stress.

Key words: *automated modeling of the flow stress of low-alloy and micro-alloy steels, dynamic structure transformation, experimental flow curves, spline interpolation, theory of the planned experiment.*