

*Кравцова С. И.**аспирант**ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ», г. Алчевск, ЛНР,**Яковченко А. В.**д.т.н., проф.**ГОУ ВПО ДНР «ДонНТУ», г. Донецк, ДНР*

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ТЕЧЕНИЯ МИКРОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ ПРИ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКЕ НА ОСНОВЕ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ПРОГРАММЫ

Известно, что при микролегировании введенный элемент может входить в состав матрицы, изменяя её характеристики. Не исключается возможность образования соединений с другими элементами, находящимися в твёрдом растворе. Если оказываются связанными вредные примеси и очищаются границы зерен, микролегирующий эффект сочетается с рафинирующим. То есть, при введении малых добавок можно говорить об их комплексном воздействии на сталь. Под микролегированием понимают введение в сплав отдельных элементов, остаточное содержание которых, не превышая 0,1 %, значительно повышает механические свойства материала [1].

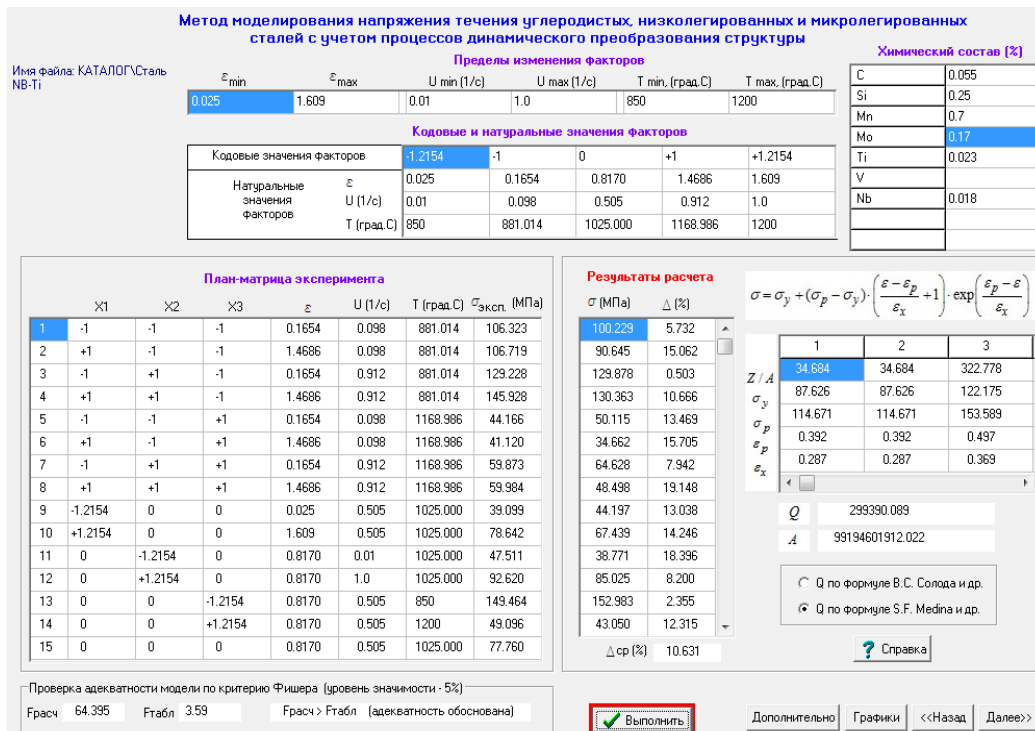
Актуальной задачей является моделирование напряжения течения микролегированных сталей при горячей прокатке. Важно также при этом установить степень влияния микролегирующих элементов на напряжение течения. Результаты моделирования представлены на рисунках 1–3.

В статье [2], используя научные основы моделирования полной кривой течения стали, созданные в работе [3 и др.], предложена математическая модель напряжения течения в зависимости от химического состава углеродистых сталей, температуры T , скорости U и накопленной деформации ϵ в рассматриваемой точке очага деформации, а также с учетом процессов динамического преобразования структуры при горячей деформации. На её основе в работе [4] создана специализированная компьютерная программа расчета напряжения течения при прокатке углеродистых сталей, которая подтвердила работоспособность математической модели [2] и её высокую эффективность. Вместе с тем на базе математической модели [2] не представляется возможным моделирование напряжения течения микролегированных сталей. В работе [3] предложена формула S. F. Medina и др. для расчёта величины энергии активации деформации Q , которая характеризует природу материала и достаточно чувствительна к небольшим изменениям химического состава. Указанная формула учитывает влияние на напряжение течения металла при горячей прокатке таких элементов как: C, Mn, Si а также микролегирующих добавок: Mo, Ti, V, Nb. Формула представлена на рисунке 1, б.

Формула для расчёта величины энергии активации деформации Q (S. F. Medina и др. [3]) включена в математическую модель [2] (см. рис. 1, б) и на этой основе усовершенствована специализированная компьютерная программа [4], окна которой показаны на рисунках 1–3. Представленные расчёты выполнены с использованием базы цифровой информации о напряжении течения микролегированной стали Nb-Ti, разработанной в работе [5].

На рисунке 3, а значения напряжения течения σ_c получены на базе математической модели [2] для углеродистой стали, химический состав которой представлен на рисунке 3, б, а параметры модели [2] на рисунке 3, в.

На рисунке 3, а значения напряжения течения σ для микролегированной стали Nb-Ti получены на базе усовершенствованной математической модели [2] путём использования формулы для величины Q (S. F. Medina и др. [3]). Микролегированная сталь Nb-Ti отличается включением малых добавок Mo, Ti, Nb в углеродистую сталь, показанную на рисунке 3, в. В окне программы на рисунке 3, а показаны соответствующие отклонения величин σ и σ_c .



Проверка адекватности модели по критерию Фишера (уровень значимости - 5%)

Грасс σ 64.395 Гтабл 3.59 Грасс > Гтабл (адекватность обоснована)

✔ Выполнить Дополнительно Графики <<Назад Далее>>

а

Основные формулы метода Солода В.С. и др. и S.F. Medina и др.

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

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

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

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

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

Q по формуле В.С. Солода и др.:

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

Q по формуле S.F. Medina и др.:

$$Q = 267000 - 2535.52(C\%) + 1010(Mn\%) + 33620.76(Si\%) + 35651.28(Mo\%) + 93680.52(Ti\%)^{0,5919} + 31673.46(V\%) + 70729.85(Nb\%)^{0,5649}$$

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

б

Рисунок 1 — Окно усовершенствованной компьютерной программы: а — проверка адекватности усовершенствованной модели по отношению к экспериментальным данным; б — усовершенствованная модель кривой течения

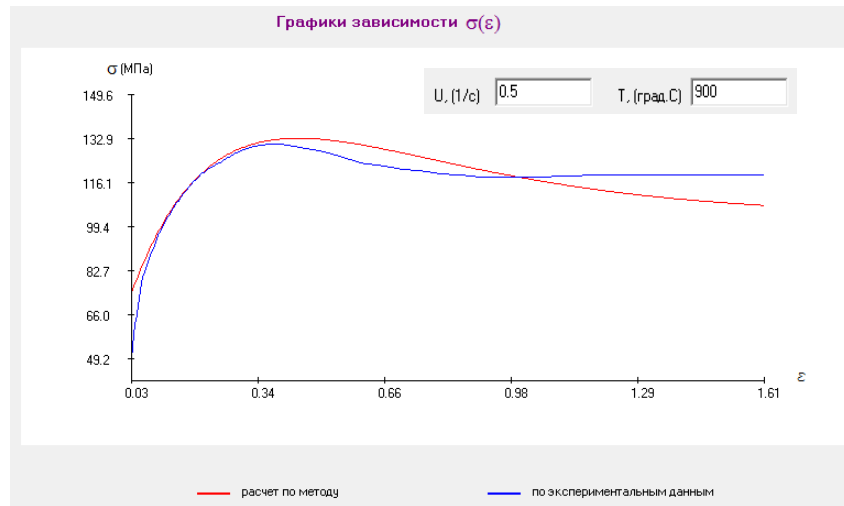


Рисунок 2 — Зависимость напряжения течения микролегированной стали Nb-Ti от логарифмической степени деформации: красным цветом показана расчётная кривая течения на базе усовершенствованной модели; синим цветом — экспериментальная кривая течения стали Nb-Ti

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

Имя файла: КАТАЛОГСталь Nb-Ti

Пределы изменения факторов

ε_{min}	ε_{max}	U min (1/с)	U max (1/с)	T min, (град.С)	T max, (град.С)
0.05	0.7	0.01	1.0	950	1150

Химический состав (%)

C	0.055
Si	0.25
Mn	0.7
Mo	0.17
Ti	0.023
V	
Nb	0.018

Кодовые и натуральные значения факторов

Кодовые значения факторов	-1, 2154	-1	0	+1	+1, 2154	
Натуральные значения факторов	ε	0.05	0.1076	0.3750	0.6424	0.7
	U (1/с)	0.01	0.098	0.505	0.912	1.0
	T (град.С)	950	967.723	1050.000	1132.277	1150

План-матрица эксперимента

	X1	X2	X3	ε	U (1/с)	T (град.С)	σ_c (МПа)
1	-1	-1	-1	0.1076	0.098	967.723	62.700
2	+1	-1	-1	0.6424	0.098	967.723	65.606
3	-1	+1	-1	0.1076	0.912	967.723	80.195
4	+1	+1	-1	0.6424	0.912	967.723	95.368
5	-1	-1	+1	0.1076	0.098	1132.277	52.560
6	+1	-1	+1	0.6424	0.098	1132.277	48.676
7	-1	+1	+1	0.1076	0.912	1132.277	66.319
8	+1	+1	+1	0.6424	0.912	1132.277	71.807
9	-1, 2154	0	0	0.05	0.505	1050.000	50.923
10	+1, 2154	0	0	0.7	0.505	1050.000	72.542
11	0	-1, 2154	0	0.3750	0.01	1050.000	45.051
12	0	+1, 2154	0	0.3750	1.0	1050.000	92.085
13	0	0	-1, 2154	0.3750	0.505	950	97.712
14	0	0	+1, 2154	0.3750	0.505	1150	72.692
15	0	0	0	0.3750	0.505	1050.000	83.656

Результаты расчета

σ (МПа)	Δ (%)
68.911	9.013
76.256	13.966
88.937	9.829
109.651	13.026
48.408	8.576
42.187	15.382
60.832	9.020
62.419	15.040
50.791	0.259
72.302	0.332
44.900	0.336
91.839	0.268
112.863	13.424
62.604	16.114

$\Delta_{cp} (\%)$ 8.324

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

Z/A	1	2	3
σ_y	3.922	3.922	36.498
σ_p	63.327	63.327	88.294
ε_p	86.187	86.187	115.439
ε_x	0.310	0.310	0.394
	0.225	0.225	0.289

Q 299390.089
A 99194601912.022

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

? Справка

а

Химический состав (%)

C (0.05 - 1.1)	0.055
Si (0 - 1.65)	0.25
Mn (0.03 - 1.55)	0.7
Cr (0 - 0.3)	
Ni (0 - 0.3)	
P (0 - 0.05)	
S (0 - 0.05)	
V (0 - 0.26)	
Cu (0 - 0.28)	

б

Z/A	1	2	3
σ_y	1.628	1.628	15.152
σ_p	55.552	55.552	77.454
ε_p	76.812	76.812	102.881
ε_x	0.282	0.282	0.358
	0.204	0.204	0.262

Q 150285.139
A 126981.789

Q по формуле В.С. Солода и др.

в

Рисунок 3 — Влияние микролегирующих элементов на величину напряжения течения σ : а — основное окно усовершенствованной программы; б, в — фрагменты окна программы

Выводы:

1. Усовершенствованная специализированная компьютерная программа обеспечила моделирование напряжения течения микролегированных сталей на базе следующих элементов: Mo, Ti, V, Nb.
2. Для микролегированной стали Nb-Ti установлена степень влияния микролегирующих элементов на напряжение её течения. Среднее относительное отклонение значений напряжения течения микролегированной стали Nb-Ti по отношению к соответствующей углеродистой стали составило 8,3 %.

Список литературы

1. Браун, В. С. Микролегирование стали / В. С. Браун. — К. : Наук. думка, 1982. — 303 с.
2. Солод, В. С. Математическое моделирование сопротивления деформации при горячей прокатке углеродистых сталей / В. С. Солод, Я. Е. Бейгельзимер, Р. Ю. Кулагин // *Металл и литье Украины*. — 2006. — № 7–8. — С. 52–56.
3. Medina, S. F. General Expression of the Zener-Hollomon Parameter as a Function of the Chemical Composition of Low Alloy and Microalloyed Steels / S. F. Medina, C. A. Hernandez // *Acta Mater.* — 1996. — Vol. 44. — No. 1. — P. 137–148.
4. Зависимость напряжения течения стали 0,19C-0,20Si-0,40Mn, учитывающая при горячей прокатке процессы динамического преобразования структуры / А. В. Яковченко, С. А. Снитко, В. В. Пилипенко, Н. И. Ивлева // *Вестник Донецкого национального технического университета*. — 2020. — Том 19. — № 1. — С. 45–52.
5. Яковченко, А. В. Разработка компьютерной базы цифровой информации о напряжении течения микролегированной стали Nb-Ti / А. В. Яковченко, П. Н. Денищенко, С. И. Кравцова // *Тезисы докладов V межд. науч.-техн. конф.* — Алчевск : ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ», 2020. — С. 162–165.