

УДК 621.771.011

А.В. Яковченко /д.т.н./, С.А. Снитко /д.т.н./, В.В. Пилипенко
 ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)
Н.И. Ивлева
 (Донецк)

ЗАВИСИМОСТЬ НАПРЯЖЕНИЯ ТЕЧЕНИЯ СТАЛИ 0,19C-0,20Si-0,40Mn, УЧИТЫВАЮЩАЯ ПРИ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКЕ ПРОЦЕССЫ ДИНАМИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СТРУКТУРЫ

Получена зависимость для расчета напряжения течения углеродистой стали (0,19C-0,20Si-0,40Mn), учитывающая процессы динамического преобразования структуры при прокатке. Создана компьютерная база цифровой информации об экспериментальных кривых течения этой стали. Анализ точности аппроксимации экспериментальной информации на основе полученной зависимости для широкого диапазона изменения степени деформации ε (true strain), равном 0,03...1,65, показал, что относительная погрешность находится в диапазоне 1,2...15,1 %, а средняя относительная погрешность составляет 5 %. Проверка адекватности модели с помощью критерия Фишера дала удовлетворительный результат.

Ключевые слова: зависимость для расчета напряжения течения металла, динамическое преобразование структуры, экспериментальные кривые течения, сплайн-интерполяция, теория планируемого эксперимента.

Постановка проблемы

При разработке рациональных технологических процессов горячей прокатки колец важными вопросами являются расчеты деформированного состояния металла и энергосиловых параметров. Напряжение течения металла σ является одной из главных составляющих по степени влияния на результаты таких расчетов. Зависимость напряжения течения металла, полученная без учета процессов динамического преобразования структуры, дает в основном завышенные результаты, что также негативно сказывается на точности конечно-элементного моделирования процессов прокатки колец. В связи с этим актуально разработать зависимость напряжения течения стали 0,19C-0,20Si-0,40Mn с учетом динамического преобразования структуры.

Анализ последних исследований и публикаций

Основой при определении напряжения течения металла является экспериментальная информация, которая в большинстве случаев представлена в технической литературе в виде кривых $\sigma=f(\varepsilon, U, T)$ [1,2]. Известные методы расчета напряжения течения металла σ созданы для моделирования процессов, в которых степень деформации ε , как правило, не превышает 0,5 (соответственно величина (степень) суммарной относительной или истинной (логарифмической)

деформации не превышает 0,7). Основными из них являются методы В.И. Зюзина [2], В.А. Николаева [3], Л.В. Андреюка [4] и др.

Теоретические исследования процессов прокатки колец показали, что накопленная деформация за один технологический переход в отдельных элементах профиля может достигать единицы и более.

Известно, что использование известных методов расчета напряжения течения металла σ в зависимости от степени деформации ε , скорости деформации U и температуры T при увеличенных значениях степени деформации, превышающих $\varepsilon=0,5$, в основном приводит к получению существенно завышенных результатов [5, 6]. Это объясняется тем, что в процессе экстраполяции значений σ в направлении повышения степени деформации не учитывается разупрочнение металла, связанное с его динамической рекристаллизацией.

Цель (задачи) исследования

В работе поставлена задача определения параметров зависимости для расчета напряжения течения металла σ на базе теории [6], в которой учитываются химический состав углеродистых сталей, температура, скорость деформации, накопленная деформация в рассматриваемой точке очага деформации, а также процессы динамического преобразования структуры металла

в процессе его горячей прокатки. Планируется также выполнить проверку адекватности указанной зависимости, необходимой для реализации конечно-элементного моделирования процессов прокатки колец.

Основной материал исследования

При моделировании на базе теории [6] используется концепция напряжения течения, в соответствии с которой материал деформируется пластически, а сумма напряжений определяется в зависимости от пошаговой суммы деформаций по кривой течения.

Параметры указанной зависимости разработаем для стали, имеющей следующий химический состав, %: C(0,19); Si(0,2); Mn(0,4); Cr(0,11); P(0,019); S(0,011); Cu(0,16). Выбор этой стали связан, во-первых, с необходимостью конечно-элементного моделирования процессов прокатки колец из углеродистых марок сталей и, во вторых, в связи с имеющимися в работе [7] для указанного химического состава стали экспериментально полученных кривых течения, причем в достаточно широком диапазоне изменения степени деформации ϵ (true strain), равном 0,02...1,65. В работе [7] принято следующее обозначение: сталь 0,19C-0,20Si-0,40Mn, которое и будет использоваться в дальнейшем.

Экспериментальные кривые течения стали 0,19C-0,20Si-0,40Mn [7] показаны на рис. 1 в окне программы [8] задания исходной информации при создании соответствующей компьютерной базы цифровой информации. Это стало возможным в связи с тем, что отсканированная графическая информация, включающая кривые течения, была занесена в соответствующую папку и задана в качестве исходной информации.

На рис. 2 показано окно построения координатной сетки в соответствии с методикой, предложенной в работе [8]. В этом окне для всех узловых точек координатных осей ставятся в соответствие значения σ и ϵ в единицах, указанных на координатных осях, а также в единицах растрового изображения, которые определяются программно. При этом в результирующую таблицу автоматически заносятся значения абсцисс узловых точек в единицах растрового изображения, а на самом рисунке вычерчиваются вертикальные линии. Аналогичные действия выполняются и для оси ординат. Графическая визуализация построенных линий необходима для обеспечения максимально точного совпадения построенной сетки, выполненной другим цветом, с исходной координатной сеткой.

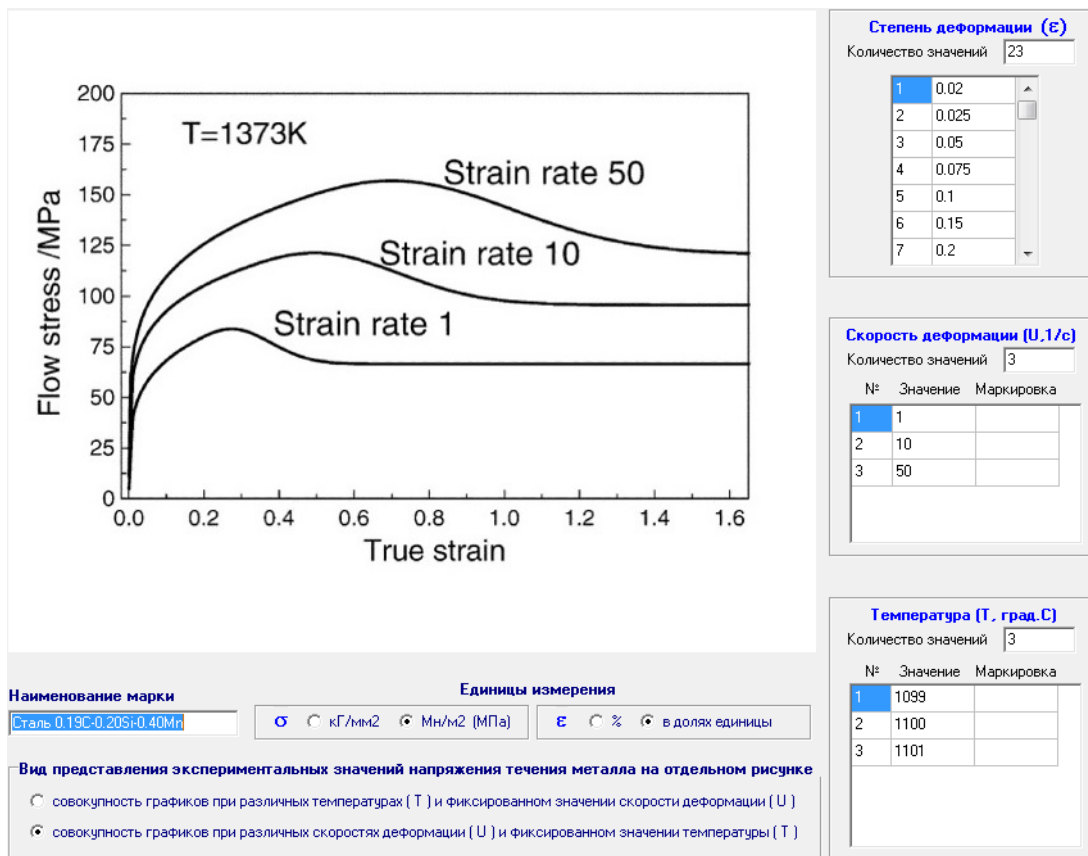


Рис. 1. Окно программы задания исходной информации при создании компьютерной базы цифровой информации о кривых течения для стали 0,19C-0,20Si-0,40Mn

Таблица экспериментальных значений напряжения течения металла σ (МПа) в зависимости от факторов: ϵ , U (1/с), T (град.С)

Степень деформации	0.02	0.025	0.05	0.075	0.1	0.15	0.2	0.3	0.4	0.45	0.5	0.6
$T = 1099, U = 1$	17.150	35.825	55.463	62.700	68.325	75.200	80.200	83.325	75.200	71.450	68.950	66.450
$T = 1099, U = 10$	40.800	56.779	78.325	87.075	93.621	100.825	106.450	113.950	120.200	121.450	122.075	119.575
$T = 1099, U = 50$	52.200	62.700	90.989	102.700	110.200	119.575	126.450	136.450	144.279	148.226	151.450	155.825
$T = 1100, U = 1$	16.950	35.625	55.263	62.500	68.125	75.000	80.000	83.125	75.000	71.250	68.750	66.250
$T = 1100, U = 10$	40.600	56.579	78.125	86.875	93.421	100.625	106.250	113.750	120.000	121.250	121.875	119.375
$T = 1100, U = 50$	52.000	62.500	90.789	102.500	110.000	119.375	126.250	136.250	144.079	148.026	151.250	155.625
$T = 1101, U = 1$	16.750	35.425	55.063	62.300	67.925	74.800	79.800	82.925	74.800	71.050	68.550	66.050
$T = 1101, U = 10$	40.400	56.379	77.925	86.675	93.221	100.425	106.050	113.550	119.800	121.050	121.675	119.175
$T = 1101, U = 50$	51.800	62.300	90.589	102.300	109.800	119.175	126.050	136.050	143.879	147.826	151.050	155.425
Степень деформации	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.65
$T = 1099, U = 1$	66.450	66.450	66.450	66.450	66.450	66.450	66.450	66.450	66.450	66.450	66.450	66.450
$T = 1099, U = 10$	119.575	113.325	107.075	100.825	98.226	96.911	96.253	96.253	96.253	96.253	96.253	96.253
$T = 1099, U = 50$	155.825	157.700	155.825	151.450	144.937	138.358	132.075	127.700	124.575	122.700	121.450	121.450
$T = 1100, U = 1$	66.250	66.250	66.250	66.250	66.250	66.250	66.250	66.250	66.250	66.250	66.250	66.250
$T = 1100, U = 10$	119.375	113.125	106.875	100.625	98.026	96.711	96.053	96.053	96.053	96.053	96.053	96.053
$T = 1100, U = 50$	155.625	157.500	155.625	151.250	144.737	138.158	131.875	127.500	124.375	122.500	121.250	121.250
$T = 1101, U = 1$	66.050	66.050	66.050	66.050	66.050	66.050	66.050	66.050	66.050	66.050	66.050	66.050
$T = 1101, U = 10$	119.175	112.925	106.675	100.425	97.826	96.511	95.853	95.853	95.853	95.853	95.853	95.853
$T = 1101, U = 50$	155.425	157.300	155.425	151.050	144.537	137.958	131.675	127.300	124.175	122.300	121.050	121.050

Рис. 4. Компьютерная база цифровой информации о кривых течения стали 0,19C-0,20Si-0,40Mn

Цвет интерполяционных кривых пользователь выбирает таким образом, чтобы их было хорошо видно на фоне исходных кривых.

Таким образом, разработана компьютерная база цифровой информации (рис. 4) о кривых течения стали 0,19C-0,20Si-0,40Mn, показанных на рис. 1. Изложенная выше методика ее создания, разработанная в [8], основывается на наиболее точном описании экспериментальных кривых течения соответствующими сплайн-кривыми.

В работе [8] изложен метод автоматизированного определения напряжения течения металла σ в зависимости от фиксированных значений степени деформации ϵ , скорости деформации U и температуры T , основанный на использовании компьютерных баз цифровой информации для сталей и сплавов.

На рис. 5а показано окно компьютерной программы определения параметров зависимости для расчета напряжения течения металла σ на базе теории [6]. Указанная зависимость представлена в правой части окна. Основные формулы для расчета этих параметров, представленные в работе [6], показаны на рис. 5б. 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 динамиче-

ской рекристаллизации при достижении деформации ϵ_x .

Влияние химического состава стали отражается величиной энергии активации деформации Q (кДж·моль⁻¹), которая входит в комплексный температурно-скоростной параметр процесса деформации (параметр Zener-Hollomon (z), A – скоростная константа деформируемого материала [6].

Актуальной задачей является выполнение научно обоснованного анализа точности зависимости для расчета напряжения течения металла σ , для которой в окне программы (рис. 5а) определены искомые термокинетические параметры применительно к стали 0,19C-0,20Si-0,40Mn.

В работе [8] создана компьютерная программа, 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 значения $\sigma_{экс}$. Метод автоматизированного определения экспериментальных значений напряжения течения металла σ [8] в зависимости от фиксированных значений степени деформации ϵ , скорости деформации U и температуры T основан на использовании компьютерной базы цифровой информации.

Метод Солода В.С. и др.

Химический состав [%]

Имя файла: КАТАЛОГ.Сталь
0.19C-0.20Si-0.40Mn

Пределы изменения факторов

ε_{\min}	ε_{\max}	U min (1/с)	U max (1/с)	T min. (град.С)	T max. (град.С)
0.03	1.65	1	50	1099.9	1100.1

Кодовые и натуральные значения факторов

Кодовые значения факторов	-1.2154	-1	0	+1	+1.2154	
Натуральные значения факторов	ε	0.03	0.1736	0.8400	1.5064	1.65
	U (1/с)	1	5.342	25.500	45.658	50
	T (град.С)	1099.9	1099.918	1100.000	1100.082	1100.1

C (0.05 - 1.1)	0.19
Si (0 - 1.65)	0.2
Mn (0.03 - 1.55)	0.4
Cr (0 - 0.3)	0.11
Ni (0 - 0.3)	
P (0 - 0.05)	0.019
S (0 - 0.05)	0.011
V (0 - 0.26)	
Cu (0 - 0.28)	0.16

План-матрица эксперимента

	X1	X2	X3	ε	U (1/с)	T (град.С)	$\sigma_{\text{экс}}$ (МПа)
1	-1	-1	-1	0.1736	5.342	1099.918	92.311
2	+1	-1	-1	1.5064	5.342	1099.918	82.993
3	-1	+1	-1	0.1736	45.658	1099.918	121.026
4	+1	+1	-1	1.5064	45.658	1099.918	119.762
5	-1	-1	+1	0.1736	5.342	1100.082	92.279
6	+1	-1	+1	1.5064	5.342	1100.082	82.960
7	-1	+1	+1	0.1736	45.658	1100.082	120.993
8	+1	+1	+1	1.5064	45.658	1100.082	119.729
9	-1.2154	0	0	0.03	25.500	1100.000	67.213
10	+1.2154	0	0	1.65	25.500	1100.000	108.681
11	0	-1.2154	0	0.8400	1	1100.000	66.250
12	0	+1.2154	0	0.8400	50	1100.000	154.158
13	0	0	-1.2154	0.8400	25.500	1099.9	126.748
14	0	0	+1.2154	0.8400	25.500	1100.1	126.708
15	0	0	0	0.8400	25.500	1100.000	126.728

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 (%)
93.798	1.600
80.642	2.833
119.602	1.176
113.966	4.840
93.764	1.609
80.612	2.831
119.570	1.176
113.923	4.849
72.705	8.172
102.394	5.784
68.120	2.823
130.827	15.134
117.484	7.309
117.430	7.322

$\Delta_{\text{ср}}$ (%) 4.985

Q 222686.932
A 92282229.144

Проверка адекватности модели по критерию Фишера (уровень значимости - 5%)
Грассч 20.947 Fтабл 3.59 Грассч > Fтабл (адекватность обоснована)

 Дополнительно Графики <<Назад Далее>>

а

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

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

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

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

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

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

б

Рис. 5. Окна программы определения термокинетических параметров зависимости для расчета напряжения течения металла на базе теории [6] и проверки ее адекватности: а – окно планирования эксперимента; б – формулы для расчета термокинетических параметров

С применением центрального композиционного ортогонального планирования разработана план-матрица в виде, показанном на рис. 5а. Из компьютерной базы цифровой экспериментальной информации для стали 0,19C-0,20Si-0,40Mn (см. рис. 4) в таблицу, расположенную в верхней части окна (см. рис. 5а), передаются пределы изменения факторов ε , U , T , которые в случае необходимости могут быть изменены. В этом же окне 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 с использованием компьютерной базы цифровой экспериментальной информации для стали 0,19C-0,20Si-0,40Mn (рис. 5а), а также метода и программы, представленных в [8]. Указанные метод и программа были созданы для условий, когда задаются пределы изменения каждого из трех факторов. Поэтому в решаемой задаче задана не фиксированная температура, равная 1100 °С, а интервал в диапазоне 1100±0,1 °С.

Выполнена разработка функций компьютерной программы определения соответствующих расчетных значений $\sigma_{расч}$ для каждого из 15-ти опытов на основе зависимостей, показанных на рис. 5а, 5б. С учетом значений $\sigma_{эксп}$ в окне программы (см. рис. 5а) для стали 0,19С-0,20Si-0,40Mn определили относительную погрешность для каждого из 15-ти опытов, которая находится в диапазоне 1,2...15,1 %, и среднюю относительную погрешность по всему планируемому эксперименту, которая составила 5 %.

Проверка адекватности модели с помощью критерия Фишера также реализована в компьютерной программе, окно которой показано на

рис. 5а. Указанная проверка дала удовлетворительный результат.

Выполнена разработка функций компьютерной программы расчета и построения зависимостей напряжения течения металла ($\sigma_{расч}$ и $\sigma_{эксп}$) от степени деформации ϵ при фиксированных значениях скорости деформации U и температуры T . Результаты, представленные на рис. 6, позволяют сделать вывод о том, что в диапазонах скорости деформации 1...50 с⁻¹ и степени деформации 0,03...1,65 кривые, построенные по расчетным данным, адекватно описывают экспериментальные кривые течения для стали 0,19С-0,20Si-0,40Mn.

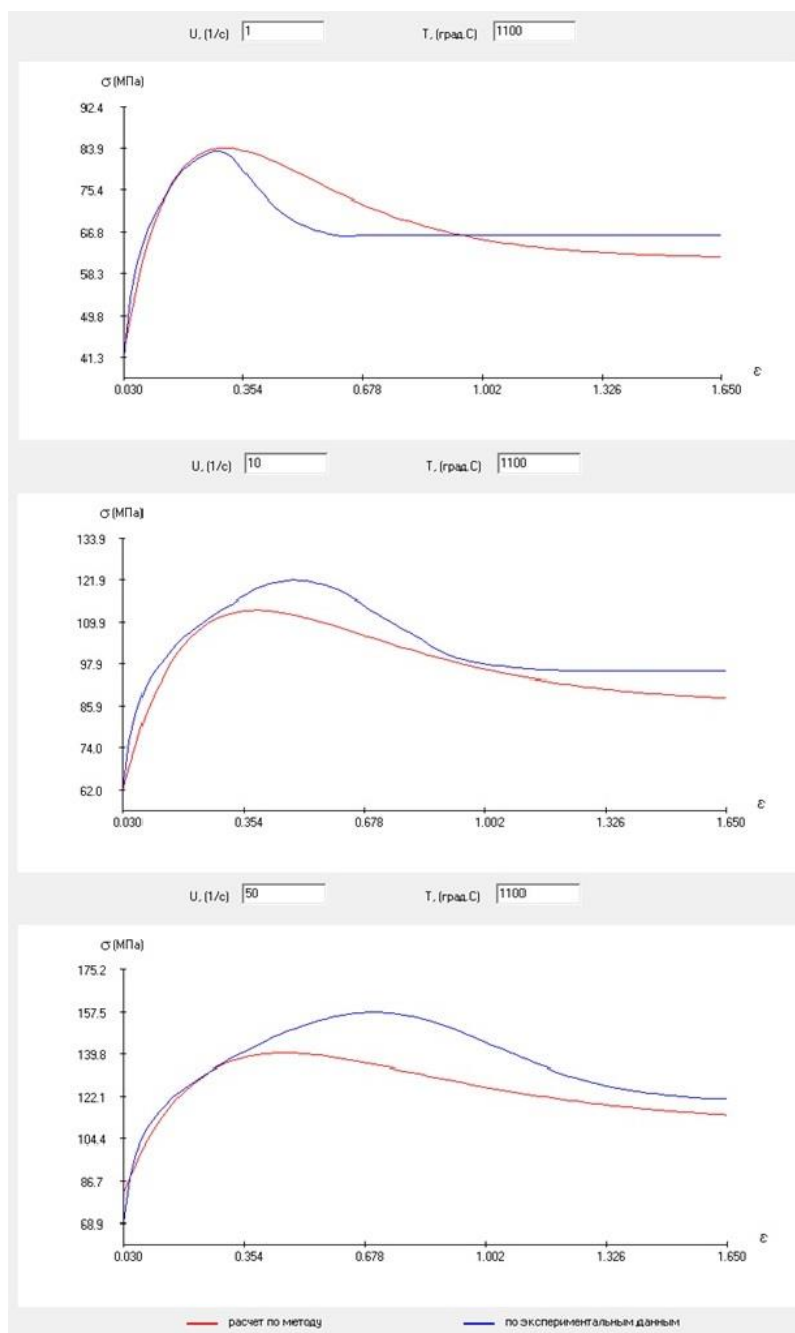


Рис. 6. Расчетные $\sigma_{расч}$ и экспериментальные $\sigma_{эксп}$ зависимости напряжения течения стали 0,19С-0,20Si-0,40Mn от степени деформации ϵ при фиксированных значениях U и T

Выводы

Установлено, что зависимость для расчета напряжения течения металла, разработанная на базе теории, учитывающей химический состав углеродистой стали (0,19C-0,20Si-0,40Mn), температуру, скорость деформации, накопленную деформацию в рассматриваемой точке очага деформации, а также процессы динамического преобразования структуры металла при его горячей пластической деформации, адекватно описывает экспериментальные кривые течения для широкого диапазона изменения степени деформации ϵ (true strain), равного 0,03... 1,65, и может использоваться для конечно-элементного моделирования процессов прокатки колец.

Список литературы

1. Полухин, П.И. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов: справочник / П.И. Полухин, Г.Я. Гун, А.М. Галкин. – М.: Металлургия, 1976. – 488 с.
2. Теория прокатки: справочник / А.И. Целиков [и др.]. – М.: Металлургия, 1982. – 335 с.
3. Теория и практика процессов прокатки: учеб. пособие. – Запорожье: ЗГИА, 2002. – 232 с.
4. Андреюк, Л.В. Аналитическая зависимость сопротивления деформации сталей и сплавов

от их химического состава / Л.В. Андреюк, Г.Г. Тюленев, Б.С. Прицкер // Сталь. – 1972. – №6. – С. 522-523.

5. Снитко, С.А. Влияние параметров конечно-элементных моделей на точность расчета формоизменения металла и сил при штамповке и прокатке заготовок железнодорожных колес / С.А. Снитко, А.А. Дужуржи // Обработка материалов давлением: сб. науч. тр., 2010. – Вып.1(22). – С. 44-48.
6. 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.
7. Yanagida, A. A novel approach to determine the kinetics for dynamic recrystallization by using the flow curve / A. Yanagida, J. Yanagimoto // Journal of Materials Processing Technology. – 2004. – Iss.1-3. Vol.151. – P.33-38.
8. Яковченко, А.В. Методы компьютерного моделирования напряжения течения металла в процессах горячей пластической деформации: учеб. пособие для обучающихся образоват. учреждений высш. проф. образования / А.В. Яковченко, С.А. Снитко, Н.И. Ивлева. – Донецк: ДОННТУ, 2018. – 197 с.

A.V. Yakovchenko /Dr. Sci. (Eng.)/, S.A. Snitko / Dr. Sci. (Eng.)/, V.V. Pilipenko
Donetsk National Technical University (Donetsk)

N.I. Ivleva
(Donetsk)

THE FUNCTION OF THE FLOW STRESS OF STEEL 0.19C-0.20Si-0.40Mn WITH ACCOUNTING THE PROCESSES OF DYNAMIC TRANSFORMATION OF THE STRUCTURE DURING HOT ROLLING

Background. *Calculations of the deformed state of the metal and energy-power parameters are essential issues when developing rational technological processes for hot rolling of rings. The metal flow stress σ is one of the main factors that influence the results of such calculations. The dependence of the metal flow stress, obtained without taking into account the processes of dynamic transformation of the structure, gives generally inflated results, which also negatively affects the accuracy of finite element modelling of ring rolling processes. In this regard, it is necessary to develop the dependence of 0.19C-0.20Si-0.40Mn steel flow stress, taking into account the dynamic transformation of the structure.*

Materials and/or methods. *The thermokinetic parameters of the dependence for calculating the steel flow stress (0.19C-0.20Si-0.40Mn) are determined based on the theory that takes into account the processes of dynamic transformation of the structure in the rolling processes. The method for automated determination of the metal flow stress based on experimental flow curves is used. The accuracy of the experimental information approximation based on the obtained dependence is determined based on the spline interpolation of the practical information and the theory of the planned experiment. The model adequacy test performed using the Fischer F-test for the case of multidimensional regression.*

Results. *The dependence for calculating the flow stress of carbon steel (0.19C-0.20Si-0.40Mn) obtained accounting the processes of dynamic transformation of the structure during rolling. A computer database of digital information about experimental flow curves of this steel created. Analysis of the*

accuracy of approximation of preliminary information based on the obtained dependence for a wide range of changes in the degree of deformation (true strain), equal to 0.03...1.65, showed that the relative error is in the field of 1.2...15.1 %, and the average relative error is 5 %. Checking the adequacy of the model using the Fischer criterion gave a satisfactory result.

Conclusion. The dependence for calculation of the stress of the metal flow developed following the theory which takes into account the chemical composition of carbon steel (0.19C-0.20Si-0.40Mn), temperature, strain rate, accumulated strain in the point of deformation and dynamic processes of transformation of the metal structure under its hot plastic deformation, adequately describes the experimental flow curves for a wide range of variation degrees of deformation (true strain) equal to 0,03...1.65 and can be used for finite element modelling of ring rolling processes.

Keywords: dependence for calculating the metal flow stress, dynamic transformation of the structure, experimental flow curves, spline interpolation, theory of the planned experiment.

Сведения об авторах

А.В. Яковченко

SPIN-код: 1314-1795
 Author ID: 850425
 ORCID iD: 0000-0003-2320-9504
 Телефон: +380 (71) 334-82-35
 Эл. почта: mond1991@mail.ru

В.В. Пилипенко

SPIN-код: 9290-0787
 Author ID: 1030563
 ORCID iD: 0000-0002-6132-5605
 Телефон: +380 (71) 414-20-36
 Эл. почта: VictorPilipenkoDNTU@gmail.com

С.А. Снитко

SPIN-код: 8463-3786
 Author ID: 844696
 ORCID iD: 0000-0002-1099-5801
 Телефон: +380 (71) 420-66-39
 Эл. почта: snitko_sa@mail.ru

Н.И. Ивлева

Телефон: +380 (62) 304-33-77
 Эл. почта: iv122@mail.ru

Статья поступила 31.01.2020 г.

© А.В. Яковченко, С.А. Снитко, В.В. Пилипенко, Н.И. Ивлева, 2020
 Рецензент д.т.н., проф. А.А. Троянский

**Архив номеров
 международных научно-технических
 и производственных журналов**

eLIBRARY.RU

**Вибрация машин:
 измерение, снижение, защита**

**Металлургические
 процессы и оборудование**