

УДК 621.771.23(075.8)

д.т.н. Яковченко А. В.,
Кравцова С. И.
(ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР, mond1991@mail.ru)

КОЭФФИЦИЕНТ УЧЕТА ИСТОРИИ НАГРУЖЕНИЯ ПРИ РАСЧЕТЕ НАПРЯЖЕНИЯ ТЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛА В ПРОЦЕССАХ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ

Определение на базе экспериментальных кривых упрочнения среднего в очаге значения напряжения течения металла в зависимости от значений степени и скорости деформации, рассчитанных по формулам С. Экелунда или А. И. Целикова, не учитывает влияния особенностей изменения этих величин по длине очага при горячей прокатке, как правило, дает завышенный результат и требует учета коэффициента истории нагружения K_i . Получены значения коэффициентов K_i для более чем 60-ти конструкционных, инструментальных и нержавеющей марок сталей.

Ключевые слова: уравнение А. Надаи, кривая распределения напряжения течения металла при горячей прокатке, компьютерная база цифровой информации о кривых деформационного упрочнения, сплайн-интерполяция кривых упрочнения, коэффициент учета истории нагружения.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Напряжение течения металла σ является одной из главных составляющих по степени влияния на результаты расчетов энергосиловых параметров в процессах горячей прокатки. Совершенствование метода расчета среднего в очаге деформации напряжения течения металла является актуальной задачей.

Известно, что напряжение течения металла при горячей деформации зависит в основном от температуры T , степени ε и скорости деформации U . В технической литературе имеется обширная информация об экспериментальных кривых деформационного упрочнения сталей, например, [1–3], в которой σ представлено в зависимости от степени деформации ε или величины суммарной относительной деформации $\bar{\varepsilon}$

$$\varepsilon = \frac{H-h}{H}, \quad (1)$$

$$\bar{\varepsilon} = \ln \frac{H}{h}, \quad (2)$$

где H , h — высота полосы до и после обжатия соответственно.

Известно соотношение между ε и $\bar{\varepsilon}$, например, [4]

$$\bar{\varepsilon} = \ln(1-\varepsilon)^{-1}, \quad \varepsilon = 1 - \exp(-\bar{\varepsilon}). \quad (3)$$

Величина средней в очаге скорости деформации U может быть определена по близким формулам С. Экелунда или А. И. Целикова

$$U_{cp} = \frac{2V_B \sqrt{(H-h)/R}}{H+h}, \quad (4)$$

$$U_{cp} = \frac{V_1 \varepsilon}{L}, \quad (5)$$

где V_B — окружная скорость вращения валков, имеющих радиус R ; V_1 — скорость металла на выходе из очага деформации; L — длина очага деформации $L = \sqrt{R(H-h)}$.

Наиболее точное значение среднего в очаге деформации при горячей прокатке напряжения течения металла (обозначим эту величину σ_1) можно получить на основе соответствующей кривой распределения σ по длине очага, построенной на базе экспериментальных кривых деформационного упрочнения для рассматриваемой стали с учетом кривых распределения

по длине очага степени ε и скорости деформации U . В работе [4] представлены метод и компьютерная программа расчета кривой распределения напряжения течения металла с учетом истории процесса нагружения на основе уравнения А. Надаи, а также сплайн-интерполяции экспериментальных кривых деформационного упрочнения и кривых распределения в очаге степени и скорости деформации.

Некоторая погрешность при расчете среднего в очаге деформации при горячей прокатке значения напряжения течения металла будет получена в случае его определения на базе экспериментальных кривых деформационного упрочнения с учетом средних значений степени и скорости деформации, найденных из соответствующих кривых распределения этих величин по длине очага деформации.

Еще большая погрешность при расчете среднего в очаге деформации при горячей прокатке значения напряжения течения металла (обозначим эту величину σ_3) будет получена в случае его определения на базе экспериментальных кривых деформационного упрочнения с учетом значений степени и скорости деформации, найденных по формулам (1–5). Это связано с тем, что они отличаются от средних значений, найденных на основе соответствующих кривых распределения по длине очага деформации.

Постановка задачи. Введем коэффициент учета истории нагружения (K_u) при расчете среднего в очаге деформации напряжения течения металла в процессах горячей прокатки как отношение величин σ_1 / σ_3 .

Соответственно, если для конкретной марки стали известен коэффициент K_u , а также среднее в очаге деформации при горячей прокатке значение σ_3 , которое было определено с использованием формул (1–5), то уточненное значение средней величины напряжения течения металла можно будет определить следующим образом

$$\sigma_1 = K_u \cdot \sigma_3. \quad (6)$$

Поставлена задача разработки метода определения коэффициента K_u и его значений для широкого марочного сортамента конструкционных, инструментальных и нержавеющей марок сталей.

Изложение материала и его результаты. Определение коэффициента K_u выполним на примере инструментальной легированной стали марки ХВГ. На первом этапе необходимо на основе метода, изложенного в работе [4], создать компьютерную базу цифровой информации о кривых деформационного упрочнения стали марки ХВГ (рис. 1) (полная таблица базы представлена в работе [4]).

Коэффициент учета истории нагружения K_u при расчете среднего в очаге деформации при горячей прокатке значения напряжения течения металла определяли также в зависимости от трех факторов: ε , L / h_{cp} , T .

Исходя из требования использования в процессе решения поставленной задачи только экспериментальной информации по кривым деформационного упрочнения (то есть без привлечения эмпирических формул) были выбраны общие для всех марок сталей пределы изменения этих факторов, которые представлены на рисунке 2.

Имя файла: КАТАЛОГ\Общий список сталей\3\ХВГ.стр.92, рис.11, 74-75

Наименование марки: ХВГ

Степень деформации (ε): Количество значений: 8. Значения: 0.050, 0.100, 0.150, 0.200

Скорость деформации (U, 1/с): Количество значений: 25. Значения: 0.1, 0.2, 0.3, 0.4

Температура (T, град.С): Количество значений: 7. Значения: 900, 950, 1000, 1050

Продолжить...

Таблица экспериментальных значений напряжения течения металла (МПа) в зависимости от факторов (ε, U, T)

Степень деформации	0.200	0.250	0.300	0.350	0.400
T = 900, U = 80	252.595	263.218	272.205	276.899	277.918
T = 900, U = 100	256.691	267.481	276.605	281.378	282.416
T = 950, U = 0.1	105.046	109.466	113.200	115.150	115.581
T = 950, U = 0.2	114.297	119.109	123.166	125.293	125.754

Рисунок 1 Окно формирования компьютерной базы цифровой информации о кривых деформационного упрочнения стали марки ХВГ

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

На рисунке 3 показано окно программы, в котором автоматически формируется матрица расчетного планируемого эксперимента. Эксперимент спланирован по плану второго порядка, применено центральное композиционное ортогональное планирование в зависимости от трех факторов: ε , L/h_{cp} , T .

При этом план-матрица для 3-х факторов содержит 15 опытов. Для каждого опыта выполнен расчет значений H, h ,

удовлетворяющих соответствующим факторам ε , L/h_{cp} .

На рисунке 4 показано окно программы расчета геометрических параметров очага деформации при прокатке полосы на гладких цилиндрических валках, а также зависимости степени деформации ε от времени τ по длине очага при прокатке на базе метода [4].

Пределы изменения факторов

ε_{\min}	ε_{\max}	$L/h_{cp} \min$	$L/h_{cp} \max$	$T \min, (\text{град.С})$	$T \max, (\text{град.С})$
0.27	0.3	1.3	1.5	1000	1150

Радиус валка (мм) <input style="width: 80%;" type="text" value="250"/>	n (об.мин) <input style="width: 80%;" type="text" value="200"/>
--	---

$\varepsilon = \frac{H-h}{H}$

$\varepsilon = Ln \left(\frac{H}{h} \right)$

Рисунок 2 Пределы изменения факторов ε , L/h_{cp} , T , которые использовали при определении коэффициента учета истории нагружения K_i

Расчет коэффициента K_i

Имя файла: КАТАЛОГ\Общий список сталей\3\ВГ_стр.92, рис.11. 74-75

Пределы изменения факторов

ε_{\min}	ε_{\max}	$L/h_{cp} \min$	$L/h_{cp} \max$	$T \min, (\text{град.С})$	$T \max, (\text{град.С})$
0.27	0.3	1.3	1.5	1000	1150

Кодовые и натуральные значения факторов

Кодовые значения факторов	-1	0	+1			
Натуральные значения факторов	ε	0.27	0.2727	0.2850	0.2973	0.3
	L/h_{cp}	1.3	1.318	1.400	1.482	1.5
	$T (\text{град.С})$	1000	1013.292	1075.000	1136.708	1150

План-матрица эксперимента

	X1	X2	X3	ε	L/h_{cp}	$T (\text{град.С})$	$H (\text{мм})$	$h (\text{мм})$	$\sigma_1 (\text{МПа})$	$\sigma_2 (\text{МПа})$	$\sigma_3 (\text{МПа})$	$K_i = \sigma_1 / \sigma_3$
1	-1	-1	-1	0.2727	1.318	1013.292	51.872	37.726	133.841	133.843	156.570	0.85483
2	+1	-1	-1	0.2973	1.318	1013.292	58.014	40.766	136.083	136.082	159.032	0.85569
3	-1	+1	-1	0.2727	1.482	1013.292	41.148	29.927	135.320	135.320	158.393	0.85433
4	+1	+1	-1	0.2973	1.482	1013.292	46.051	32.360	137.542	137.543	160.882	0.85492
5	-1	-1	+1	0.2727	1.318	1136.708	51.872	37.726	96.840	96.840	113.318	0.85459
6	+1	-1	+1	0.2973	1.318	1136.708	58.014	40.766	98.466	98.465	115.101	0.85547
7	-1	+1	+1	0.2727	1.482	1136.708	41.148	29.927	97.899	97.899	114.637	0.85399
8	+1	+1	+1	0.2973	1.482	1136.708	46.051	32.360	99.508	99.510	116.440	0.85459
9	-1.2154	0	0	0.27	1.400	1075.000	45.462	33.187	112.515	112.515	131.664	0.85456
10	+1.2154	0	0	0.3	1.400	1075.000	52.134	36.494	114.787	114.787	134.182	0.85546
11	0	-1.2154	0	0.2850	1.3	1075.000	56.414	40.336	112.954	112.953	132.104	0.85503
12	0	+1.2154	0	0.2850	1.5	1075.000	42.544	30.419	114.442	114.446	133.982	0.85416
13	0	0	-1.2154	0.2850	1.400	1000	48.751	34.857	141.977	141.976	166.072	0.85491
14	0	0	+1.2154	0.2850	1.400	1150	48.751	34.857	95.386	95.385	111.623	0.85453
15	0	0	0	0.2850	1.400	1075.000	48.751	34.857	113.701	113.701	133.023	0.85475

Очистить Номер опыта

Рисунок 3 План-матрица эксперимента при расчете средних значений напряжения течения металла и коэффициента учета истории нагружения

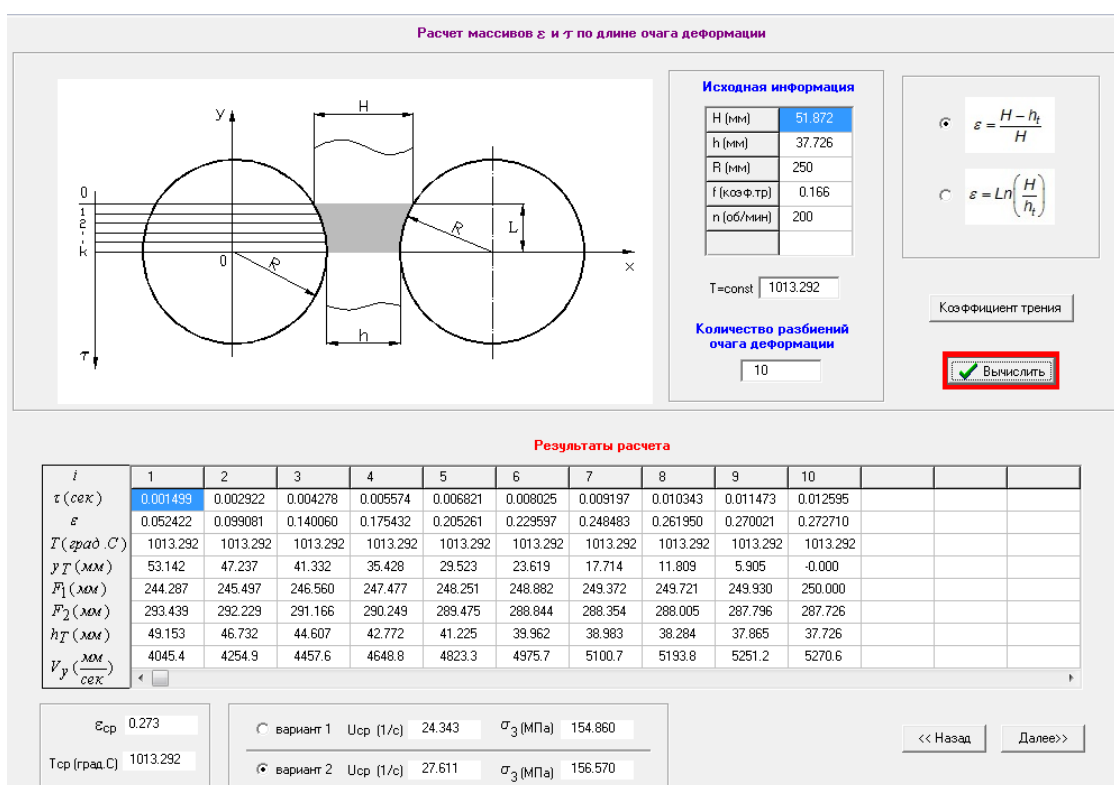


Рисунок 4 Окно программы расчета зависимости степени деформации ε от времени τ по длине очага деформации при прокатке (для стали марки ХВГ)

На рисунке 5 показано окно программы расчета зависимости скорости деформации U и напряжения течения металла σ от времени τ по длине очага при прокатке. Метод расчета изложен в работе [4]. При этом учитываются кривые распределения в очаге степени ε и скорости деформации U , а также предусматривается построение (на базе сплайн-интерполяции экспериментальных кривых деформационного упрочнения) соответствующей кривой распределения σ с учетом истории процесса нагружения на основе уравнения А. Надаи.

Для опыта № 1 (рис. 3) представлены графические зависимости $\varepsilon(\tau)$, $U(\tau)$, $T(\tau)$, $\sigma(\tau)$ (рис. 6) по длине очага при прокатке (для стали марки ХВГ).

На рисунке 5 в предпоследней строке нижней части таблицы представлен ряд значений функции σ , найденных с учетом истории процесса нагружения на основе уравнения А. Надаи. Используя эти значе-

ния, определили величину среднего в очаге деформации значения напряжения течения металла $\sigma_1 = 133.8$ МПа. Расчет соответствующего интеграла при решении уравнения А. Надаи выполнялся на основе данных, получаемых путем сплайн-интерполяции экспериментальных кривых деформационного упрочнения [4].

В последней строке указанной таблицы представлен ряд значений функции $\sigma_{эксн}$, найденных непосредственно путем сплайн-интерполяции кривых деформационного упрочнения с учетом дискретных значений в очаге степени и скорости деформации, взятых из соответствующих кривых распределения ε и U .

На основе $\sigma_{эксн}$ определили величину среднего в очаге деформации значения напряжения течения металла $\sigma_2 = 133.8$ МПа. Значения σ_1 и σ_2 , которые относятся к опыту № 1, указаны в таблице на рисун-

ке 3. Необходимо обратить внимание на то, что соответствующие значения напряжений σ и $\sigma_{эксн}$, определенные с использованием различных методов, совпадают с высокой точностью. Соответственно, равны между собой величины σ_1 и σ_2 .

Величину среднего в очаге деформации значения напряжения течения металла $\sigma_3 = 156.6$ МПа определили путем сплайн-интерполяции кривых деформационного упрочнения с учетом значений степени и скорости деформации, найденных по формулам (1) и (4) соответственно. Это значение σ_3 , которое также относится к опыту № 1, указано в таблице на рисунке 3. Коэффициент $Ku = 0.85$, также указанный в этой таблице, определили по формуле (6) на основе значений соответствующих величин $\sigma_1 = 133.8$ МПа и $\sigma_3 = 156.6$ МПа.

Расчеты 15-ти коэффициентов Ku по план-матрице, представленной на рисунке 3, выполнены для того, чтобы проверить степень влияния на них факторов ε ,

L/h_{cp} , T . Отметим, что в расчетах не учитывали изменение температуры T по длине очага деформации, хотя метод и программа [4] такую возможность дают.

Для стали марки ХВГ коэффициент Ku получен в интервале 0.853–0.856, то есть практически он мало зависит от факторов ε , L/h_{cp} , T . Аналогичный результат получен и для других марок сталей.

Безусловно, выбран довольно узкий диапазон изменения факторов ε , L/h_{cp} (см. рис. 2). Это связано с тем, чтобы для значительного количества марок сталей имелась возможность выполнить решение поставленной задачи в этом диапазоне факторов путем сплайн-интерполяции экспериментальной цифровой информации о кривых деформационного упрочнения (то есть без привлечения эмпирических формул для σ и без выполнения расчетов σ по длине очага деформации в режиме экстраполяции).

Исходная информация

Количество точек: 10

Тип задания информации в таблице: вся информация расчет U по ε расчет ε по U $\varepsilon(t)$ расчет τ по U, ε $\tau(t)$ $T \neq const$ ΔT : 10

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
τ (сек)	0.001499	0.002922	0.004278	0.005574	0.006821	0.008025	0.009197	0.010343	0.011473	0.012595
ε	0.052422	0.099081	0.140060	0.175432	0.205261	0.229597	0.248483	0.261950	0.270021	0.272710
u (1/сек)										
T (град C)	1013.292	1013.292	1013.292	1013.292	1013.292	1013.292	1013.292	1013.292	1013.292	1013.292

Количество дополнительных точек на каждом интервале:

Тип расчета: в заданный момент времени k равномерно распределенных значений k: 10

Выполнить <<Назад

Результаты расчета

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
τ (сек)	0.001499	0.002732	0.003965	0.005198	0.006431	0.007663	0.008896	0.010129	0.011362	0.012595
ε	0.052422	0.093026	0.130932	0.165590	0.196401	0.222790	0.244116	0.259833	0.269465	0.272710
u (1/сек)	32.789178	31.782925	29.493582	26.608283	23.261905	19.412382	15.079488	10.322290	5.147906	2.396613
T (град C)	1013.292	1013.292	1013.292	1013.292	1013.292	1013.292	1013.292	1013.292	1013.292	1013.292
$\partial\sigma/\partial\varepsilon$	380.05264	359.37337	299.71193	269.27883	196.61787	111.20668	101.62579	107.03614	97.93222	89.75862
$\partial\sigma/\partial u$	0.36668	0.41868	0.44797	0.46324	0.51571	0.62151	0.70267	0.80347	2.75344	4.98821
$\partial\sigma/\partial T$	-0.34143	-0.39087	-0.42804	-0.45576	-0.47460	-0.48020	-0.47795	-0.47183	-0.44627	-0.41624
$d\varepsilon/d\tau$	32.78918	32.13849	29.48564	26.65135	23.27387	19.44977	15.08938	10.33889	5.24939	2.39661
$du/d\tau$	-880.7966	-1170.6307	-2248.6828	-2517.3447	-2916.4112	-3326.7660	-3697.2549	-4003.5680	-3523.4258	-2122.4260
$dT/d\tau$	-0.00000	-0.00000	-0.00000	-0.00000	0.00000	0.00000	-0.00000	-0.00000	0.00000	-0.00000
$d\sigma/d\tau$	12138.6400	11059.6029	7829.8555	6010.5045	3072.0401	95.3115	-1064.4948	-2110.1102	-9187.4624	-10371.9941
σ (МПа)	104.27893	119.33467	130.69582	139.17052	144.91319	146.64278	145.94935	144.04992	136.27521	127.10033
$\sigma_{эксн}$ (МПа)	104.27893	119.33467	130.69529	139.17011	144.91280	146.64218	145.94870	144.04943	136.28979	127.11030

Рисунок 5 Окно программы расчета зависимости скорости деформации U и напряжения течения металла σ от времени τ по длине очага при прокатке

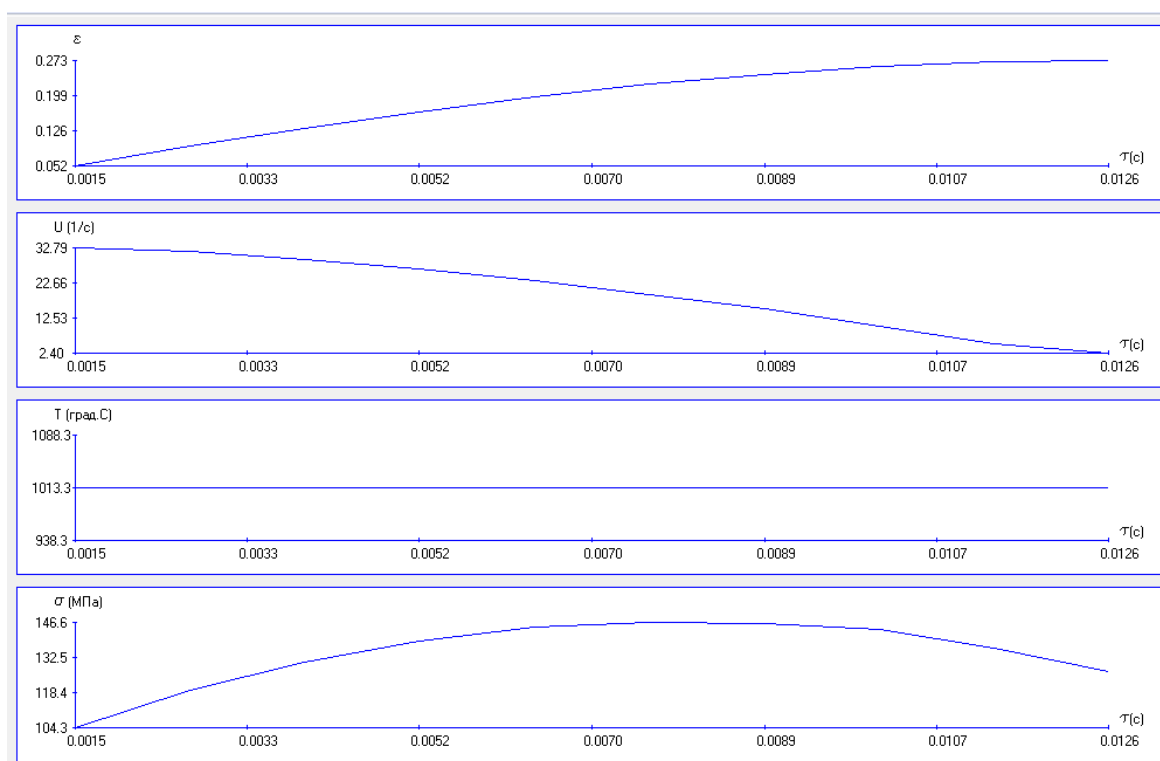


Рисунок 6 Окно программы визуализации графических зависимостей $\varepsilon(\tau)$, $U(\tau)$, $\sigma(\tau)$ по длине очага при прокатке (для стали марки ХВГ)

В таблице 1 представлены значения коэффициентов Ku для более чем 60-ти конструкционных, инструментальных и нержавеющей марок сталей. Расчеты выполнены в окнах программы, показанных на рисунках 3–5, по единой методике. Выде-

лено несколько групп марок сталей, для которых определены указанные коэффициенты. Найденные значения лежат в диапазоне $0.75 < Ku(\text{ср.}) \leq 1.05$. Представленные значения округлены до двух знаков после запятой.

Таблица 1

Значения коэффициента Ku для конструкционных, инструментальных и нержавеющей марок сталей

1	Марка стали 2	Ku (min) 3	Ku (max) 4	Ku (ср.) 5
(0.75 < Ku (ср.) ≤ 0.80)				
1	[2], Сталь 45, стр. 153, рис. 65	0.76	0.77	0.77
2	[1], Сталь 45, стр. 105, рис. 28	0.77	0.78	0.78
3	[3], 18ХГТ, стр. 82, рис. II. 44–45	0.78	0.78	0.78
4	[3], 20ХНГР, стр. 84, рис. II. 50–51	0.79	0.80	0.80
5	[1], 14ГН, стр. 119, рис. 49	0.79	0.81	0.80
6	[1], 15СХНД, стр. 133, рис. 71	0.79	0.80	0.80
7	[1], У8, стр. 156, рис. 107	0.79	0.80	0.80
8	[1], У12А, стр. 159, рис. 111	0.78	0.81	0.80
9	[3], У8, стр. 75, рис. II. 23-24	0.79	0.80	0.80

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5
(0,80 < $K_{и}$ (ср.) ≤ 0,85)				
10	[1], Ст3, стр. 101, рис. 22	0.80	0.81	0.81
11	[1], ШХ15, стр. 163, рис. 118	0.80	0.81	0.81
12	[3], Сталь 20, стр. 71, рис. II. 10–11	0.80	0.81	0.81
13	[2], 18ХНВА, стр. 87, рис. 37	0.80	0.86	0.83
14	[3], 40Х, стр. 76, рис. II. 26–27	0.81	0.81	0.81
15	[3], ШХ15, стр. 78, рис. II. 32–33	0.80	0.81	0.81
16	[1], ХВГ, стр. 137, рис. 79	0.81	0.82	0.82
17	[1], Сталь 20, стр. 98, рис. 18	0.81	0.82	0.82
18	[1], Сталь 45, стр. 105, рис. 29	0.81	0.82	0.82
19	[1], 40Х, стр. 122, рис. 52	0.81	0.82	0.82
20	[1], 10Х17Н13М2Г, стр. 221, рис. 195	0.81	0.82	0.82
21	[1], 12Х13, стр. 187, рис. 142	0.81	0.83	0.82
22	[1], 18ХНВА, стр. 137, рис. 80	0.80	0.84	0.82
23	[1], 60С2, стр. 161, рис. 114	0.81	0.82	0.82
24	[2], У12А, стр. 83, рис. 33	0.81	0.82	0.82
25	[2], ХВГ, стр. 85, рис. 35	0.81	0.82	0.82
26	[1], Сталь 55, стр. 108, рис. 37	0.81	0.82	0.82
27	[3], 08КП, стр. 69, рис. II. 5–6	0.82	0.82	0.82
28	[3], 14ГН, стр. 80, рис. II. 38–39	0.81	0.82	0.82
29	[3], 45ХН, стр. 83, рис. II. 47–48	0.82	0.82	0.82
30	[3], 60С2, стр. 86, рис. II. 56–57	0.81	0.82	0.82
31	[3], Ст3, стр. 72, рис. II. 14–15	0.82	0.82	0.82
32	[3], Ст6, стр. 74, рис. II. 20–21	0.81	0.82	0.82
33	[3], Сталь 08КП, стр. 69, рис. II. 5–6	0.82	0.82	0.82
34	[1], 12ХН3А, стр. 146, рис. 97	0.82	0.84	0.83
35	[2], 2Х18Н9, стр. 89, рис. 39	0.80	0.86	0.83
36	[3], 15ХСНД, стр. 79, рис. II. 35–36	0.82	0.83	0.83
37	[3], 30ХГСА, стр. 85, рис. II. 53–54	0.82	0.83	0.83
38	[3], Сталь 45, стр. 73, рис. II. 17–18	0.82	0.83	0.83
39	[1], Р18, стр. 169, рис. 130	0.83	0.84	0.84
40	[3], Х18Н12М2Г, стр. 102, рис. II. 104–105	0.84	0.84	0.84
41	[3], 12ХН3А, стр. 81, рис. II. 41–42	0.83	0.84	0.84
42	[3], Р18, стр. 103, рис. II. 107–108	0.84	0.84	0.84
43	[1], 12Х18Н9Т, стр. 211, рис. 181	0.83	0.86	0.85
44	[1], 60С2, стр. 161, рис. 113	0.84	0.85	0.85
45	[2], 60С2, стр. 84, рис. 34	0.84	0.86	0.85
46	[3], Сталь типа хромомолибденовой, стр. 88, рис. II. 62–63	0.85	0.85	0.85
47	[3], Х18Н9Т, стр. 100, рис. II. 98–99	0.85	0.85	0.85
(0,85 < $K_{и}$ (ср.) ≤ 0,90)				
48	[3], ХВГ, стр. 92, рис. II. 74–75	0.85	0.86	0.86
49	[1], 10Х17Н13М2Г, стр. 219, рис. 192	0.84	0.88	0.86
50	[1], 12Х18Н9Т, стр. 207, рис. 177	0.85	0.86	0.86
51	[1], 40Х13, стр. 191, рис. 150	0.85	0.87	0.86
52	[1], Х17Н2, стр. 200, рис. 164	0.85	0.87	0.86
53	[1], Х12, стр. 185, рис. 139	0.83	0.89	0.86
54	[2], Х18Н9Т, стр. 88, рис. 38	0.85	0.86	0.86

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5
55	[3], 4X13, стр. 97, рис. П. 89–90	0.85	0.86	0.86
56	[3], Сталь типа молибденомарганцовистой, стр. 87, рис. П. 59–60	0.85	0.86	0.86
57	[3], Сталь типа хромоникельмолибденовой, стр. 90, рис. П. 68–69	0.85	0.86	0.86
58	[3], X17H2, стр. 99, рис. П. 95–96	0.86	0.86	0.86
59	[1], 40X13, стр. 190, рис. 149	0.86	0.87	0.87
60	[2], 4X13, стр. 86, рис. 36	0.86	0.88	0.87
61	[3], 18ХНВА, стр. 91, рис. П. 71–72	0.87	0.87	0.87
62	[3], Сталь типа кремнемарганцовистой, стр. 86, рис. П. 65–66	0.86	0.87	0.87
(0.9 < $K_{и}$ (ср.) ≤ 1.0)				
63	[3], ЭП311, стр. 110, рис. П. 128–129	0.92	0.93	0.93
(1.0 < $K_{и}$ (ср.) ≤ 1.05)				
64	[3], ЭП220, стр. 112, рис. П. 134–135	1.03	1.05	1.04

Выводы и направление дальнейших исследований. Зависимость напряжения течения металла по длине очага при горячей прокатке определили с учетом истории процесса нагружения на основе уравнения А. Надаи, а также сплайн-интерполяции экспериментальных кривых деформационного упрочнения и кривых распределения в очаге степени и скорости деформации.

Показано, что определение на базе экспериментальных кривых деформационного упрочнения среднего в очаге значения на-

пряжения течения металла в зависимости от значений степени и скорости деформации, рассчитанных по формулам С. Эжелунда или А. И. Целикова, не учитывает влияния особенностей изменения этих величин по длине очага при прокатке, как правило, дает завышенный результат и требует учета коэффициента истории нагружения $K_{и}$. Получены значения коэффициента $K_{и}$ для более чем 60-ти конструкционных, инструментальных и нержавеющей марок сталей.

Библиографический список

1. Полухин, П. И. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов [Текст] : справочник / П. И. Полухин, Г. Я. Гун, А. М. Галкин. — М. : Металлургия, 1983. — 352 с.
2. Применение теории ползучести при обработке металлов давлением [Текст] / А. А. Поздеев [и др.]. — М. : Металлургия, 1973. — 192 с.
3. Теория прокатки [Текст] : справочник / А. И. Целиков [и др.]. — М. : Металлургия, 1982. — 335 с.
4. Методы компьютерного моделирования напряжения течения металла в процессах горячей пластической деформации [Текст] : учебное пособие для обучающихся образовательных учреждений высшего профессионального образования / А. В. Яковченко, С. А. Снитко, Н. И. Ивлева. — Донецк : ДонНТУ, 2018. — 197 с.

© Яковченко А. В.

© Кравцова С. И.

Рекомендована к печати к.т.н., доц., зав. каф. ОМДиМ ДонГТИ Денищенко П. Н., д.т.н., доц., зав. каф. ОМД ДонНТУ Снитко С. А.

Статья поступила в редакцию 30.09.2020.

Doctor of Technical Sciences Yakovchenko A. V., Kravtsova S. I. (DonSTI, Alchevsk, LPR, mond1991@mail.ru)

COEFFICIENT FOR CONSIDERING LOADING HISTORY AT CALCULATING METAL FLOW STRESS IN HOT ROLLING PROCESSES

The paper is devoted to determining the average stress value of metal flow in the zone on the basis of experimental hardening curves, depending on the values of degree and strain rate calculated by the formulas C. Ekelund or A. I. Tselikov, does not take into account the influence of features of changes in these values along the length of the zone during hot rolling, as a rule, gives an overestimated result and requires to take into account the K_i coefficient of loading history. The values of the K_i coefficients for more than 60 structural, tool and stainless steel grades are obtained.

Key words: *A. Nadai equation, metal flow stress distribution curve during hot rolling, computer database of digital information about strain hardening curves, spline-interpolation of hardening curves, coefficient for considering loading history.*