

УДК 621.771

Яковченко А. В.
Пугач А. А.
Ивлева Н. И.

ФОРМУЛЫ РАСЧЕТА НАПРЯЖЕНИЯ ТЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛА ДЛЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ, ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ И НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ

Актуальной задачей является получение эмпирических формул расчета напряжения течения металла для конструкционных, инструментальных и нержавеющей сталей на основе имеющейся экспериментальной пластометрической информации.

Формула, предложенная проф. Зюзиным В. И. для расчета напряжения течения металла σ [1], позволяет получить хорошие результаты и до настоящего времени находит широкое применение:

$$\sigma = \frac{A \cdot \varepsilon^{n_1} \cdot U^{n_2}}{e^{n_3 T}}, \quad (1)$$

где A, n_1, n_2, n_3 – константы, зависящие от материала;

ε – степень деформации;

U – скорость деформации;

T – температура.

Метод термомеханических коэффициентов [1], лежащий в основе получения формулы (1), позволил расчленить многофункциональную зависимость σ на ряд зависимостей между коэффициентами k_ε, k_U, k_T :

$$\sigma = \sigma_0 \cdot k_\varepsilon \cdot k_U \cdot k_T; \quad (2)$$

$$k_\varepsilon = A_1 \cdot \varepsilon^{n_1}; \quad k_U = A_2 \cdot U^{n_2}; \quad k_T = A_3 \cdot e^{-n_3 T}; \quad (3)$$

$$k_{\varepsilon_i} = \frac{\sigma_{\varepsilon_i}}{\sigma_0}; \quad k_{U_i} = \frac{\sigma_{U_i}}{\sigma_0}; \quad k_{T_i} = \frac{\sigma_{T_i}}{\sigma_0}, \quad (4)$$

где σ_0 – базисное напряжение течения металла для рассматриваемой марки стали при $\varepsilon = 0,1, U = 10 \text{ с}^{-1}, T = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$;

A_1, A_2, A_3 – константы, зависящие от материала; $\sigma_0 \cdot A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 = A$.

Вместе с тем, в технической литературе имеется ограниченное количество рабочих формул типа (1). Поэтому актуальным вопросом является их получение для широкого сортамента сталей на основе имеющейся в технической литературе экспериментальной информации.

Также актуально выполнить сопоставительный анализ методов [1] и [2, 3] определения констант A, n_1, n_2, n_3 .

Представляет интерес получить эмпирические формулы для расчета напряжения течения металла на основе полинома второй степени (пример получения такой формулы представлен в работе [4]) и сравнить точность аппроксимации формул (1) и (5):

$$\begin{aligned} \sigma = & a_0 + a_1 \cdot \varepsilon^2 + a_2 \cdot U^2 + a_3 \cdot T^2 + a_4 \cdot \varepsilon + a_5 \cdot U + a_6 \cdot T + a_7 \cdot \varepsilon \cdot U + \\ & + a_8 \cdot \varepsilon \cdot T + a_9 \cdot U \cdot T + a_{10} \cdot \varepsilon \cdot U \cdot T. \end{aligned} \quad (5)$$

Целью работы является определение констант, входящих в формулу расчета напряжения течения металла σ , предложенную Зюзиным В. И. (1), и в полином второй степени (5) для ряда конструкционных, инструментальных и нержавеющей сталей на основе сплайн-интерполяции экспериментальной информации и метода планируемого эксперимента [2, 3, 5].

На первом этапе для одной из марок сталей определим константы, входящие в формулу (1), на основе метода [1]. Затем определим эти же константы на основе метода [2, 3] и сравним полученные результаты. В обоих случаях требуемые значения напряжения течения металла σ в зависимости от ε, U, T найдем на основе экспериментальных кривых упрочнения. Определение величин σ в зависимости от произвольных значений ε, U, T выполняется следующим образом. В соответствующее окно компьютерной программы заносятся отсканированные кривые упрочнения. 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. Выполняется графическая визуализация построенных линий, которая необходима для обеспечения максимально точного совпадения построенной другим цветом сетки с исходной координатной сеткой.

На основе полученной информации для любой точки, лежащей на графике, можно определить абсциссу и ординату в растровых единицах, а затем рассчитать их в единицах, указанных на координатных осях. Программа вычисляет значения напряжения течения металла $\sigma(\varepsilon, U, T)$ и заносит их таблицу. Далее выполняется сплайн-интерполяция полученной информации и построение сплайн-кривых в окне программы. Цвет кривых пользователь выбирает таким образом, чтобы их было хорошо видно на фоне исходных кривых. Если ход исходной кривой упрочнения достаточно сложный, например, имеются перегибы и сплайн – кривая недостаточно точно ложится на исходную кривую, то можно увеличить число точек и добиться полного совпадения интерполяционной кривой и исходной.

Указанные выше расчеты выполним для стали 12ХН3А. Кривые упрочнения для этой стали представлены в работе [6] в виде зависимостей $\sigma = f(\varepsilon)$ для фиксированных температур и скоростей деформаций.

Константы $A_1, A_2, A_3, n_1, n_2, n_3$ для стали 12ХН3А, представленные в табл. 1, найдены на основе метода наименьших квадратов, используя цифровую информацию табл. 2.

Результаты расчета значений коэффициентов k_ε, k_U, k_T по формулам (4) представлены в табл. 2. Область изменения факторов определена кривыми упрочнения:

$$0,05 \leq \varepsilon \leq 0,4; \quad 0,5 \leq U \leq 50 \text{ с}^{-1}; \quad 900 \leq T \leq 1200 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Таблица 1

Результаты расчета констант, входящих в формулу (1), по методу [1]

Марка стали	A_1	n_1	A_2	n_2	A_3	n_3
12ХН3А	1,7128	0,22903	0,72622	0,14302	15,219	0,00274

$$\text{Константа } A = \sigma_0 \cdot A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 = 94,932 \cdot 1,7128 \cdot 0,72622 \cdot 15,219 = 1797,24 \text{ МПа}.$$

Необходимо отметить, что одним из недостатков метода [1] расчета констант, входящих в формулу (1), является неопределенность количества точек, в которых необходимо определять значения коэффициентов $k_{\varepsilon_i}, k_{U_i}, k_{T_i}$. Очевидно, что следует идти по пути увеличения количества указанных точек до обеспечения требуемой точности констант.

Основные результаты в работе получены на базе метода [2, 3]. На рис. 1, 2 представлены окна программы расчета констант формул (1) и (5) (см. табл. 3, 4).

Поэтому определим константы (см. табл.1) и на основе метода, предложенного в работах [2, 3]. Из базы данных для стали марки 12ХН3А в окне программы (см. рис. 1) передаются пределы изменения факторов ε, U, T . В этом же окне формируется таблица кодовых и натуральных значений факторов, а также план-матрица эксперимента. Планируемый эксперимент охватывает всю область изменения факторов ε, U, T и в соответствии с теорией [5] определяет наиболее рациональные точки для расчета величин σ на основе экспериментальной информации.

Таблица 2

Результаты расчета значений коэффициентов k_ε, k_U, k_T для стали 12ХНЗА

i	ε_i	σ_{ε_i} , МПа	k_{ε_i}	$U_i, \text{с}^{-1}$	σ_{U_i} , МПа	k_{U_i}	$T_i, \text{°C}$	σ_{T_i} , МПа	k_{T_i}
1	0,05	79,108	0,83331	0,5	64,651	0,68102	900	119,288	1,25656
2	0,06	82,346	0,86742	0,75	66,079	0,69607	909	117,092	1,23343
3	0,07	85,658	0,90230	1	67,606	0,71216	918	114,891	1,21024
4	0,08	88,932	0,93680	1,25	69,213	0,72908	927	112,686	1,18701
5	0,09	92,061	0,96975	1,5	70,879	0,74663	936	110,479	1,16377
6	0,1	94,932	1,00000	1,75	72,585	0,76459	945	108,273	1,14054
7	0,11	97,518	1,02724	2	74,310	0,78277	954	106,070	1,11733
8	0,12	99,891	1,05224	2,25	76,036	0,80095	963	103,872	1,09417
9	0,13	102,096	1,07546	2,5	77,741	0,81891	972	101,681	1,07109
10	0,14	104,175	1,09737	2,75	79,407	0,83646	981	99,499	1,04811
11	0,15	106,174	1,11842	3	81,014	0,85339	990	97,328	1,02524
12	0,16	108,075	1,13845	3,25	82,541	0,86947	999	95,171	1,00252
13	0,17	109,850	1,15714	3,5	83,969	0,88452	1008	93,021	0,97987
14	0,18	111,522	1,17476	3,75	85,278	0,89831	1017	90,869	0,95720
15	0,19	113,117	1,19156	4	86,449	0,91064	1026	88,719	0,93455
16	0,2	114,660	1,20781	4,25	87,461	0,92130	1035	86,574	0,91195
17	0,21	116,175	1,22377	4,5	88,294	0,93008	1044	84,437	0,88944
18	0,22	117,646	1,23927	4,75	88,930	0,93677	1053	82,312	0,86706
19	0,23	119,035	1,25390	5	89,347	0,94117	1062	80,203	0,84485
20	0,24	120,306	1,26729	7,5	92,249	0,97173	1071	78,113	0,82283
21	0,25	121,422	1,27904	10	94,932	1,00000	1080	76,046	0,80105
22	0,26	122,370	1,28902	12,5	97,417	1,02618	1089	74,004	0,77955
23	0,27	123,175	1,29751	15	99,724	1,05048	1098	71,993	0,75836
24	0,28	123,855	1,30467	17,5	101,873	1,07311	1107	70,016	0,73753
25	0,29	124,428	1,31071	20	103,882	1,09428	1116	68,076	0,71710
26	0,3	124,912	1,31580	22,5	105,773	1,11420	1125	66,168	0,69700
27	0,31	125,266	1,31953	25	107,565	1,13307	1134	64,286	0,67718
28	0,32	125,479	1,32178	27,5	109,277	1,15111	1143	62,425	0,65758
29	0,33	125,611	1,32316	30	110,930	1,16852	1152	60,579	0,63813
30	0,34	125,719	1,32430	32,5	112,543	1,18551	1161	58,741	0,61877
31	0,35	125,863	1,32582	35	114,137	1,20230	1170	56,908	0,59946
32	0,36	126,041	1,32770	37,5	115,730	1,21908	1179	55,072	0,58012
33	0,37	126,214	1,32952	40	117,343	1,23608	1185	53,844	0,56719
34	0,38	126,385	1,33132	42,5	118,996	1,25349	1188	53,229	0,56070
35	0,39	126,554	1,33311	45	120,709	1,27153	1197	51,372	0,54114
36	0,4	126,726	1,33491	50	124,391	1,31032	1200	50,749	0,53458

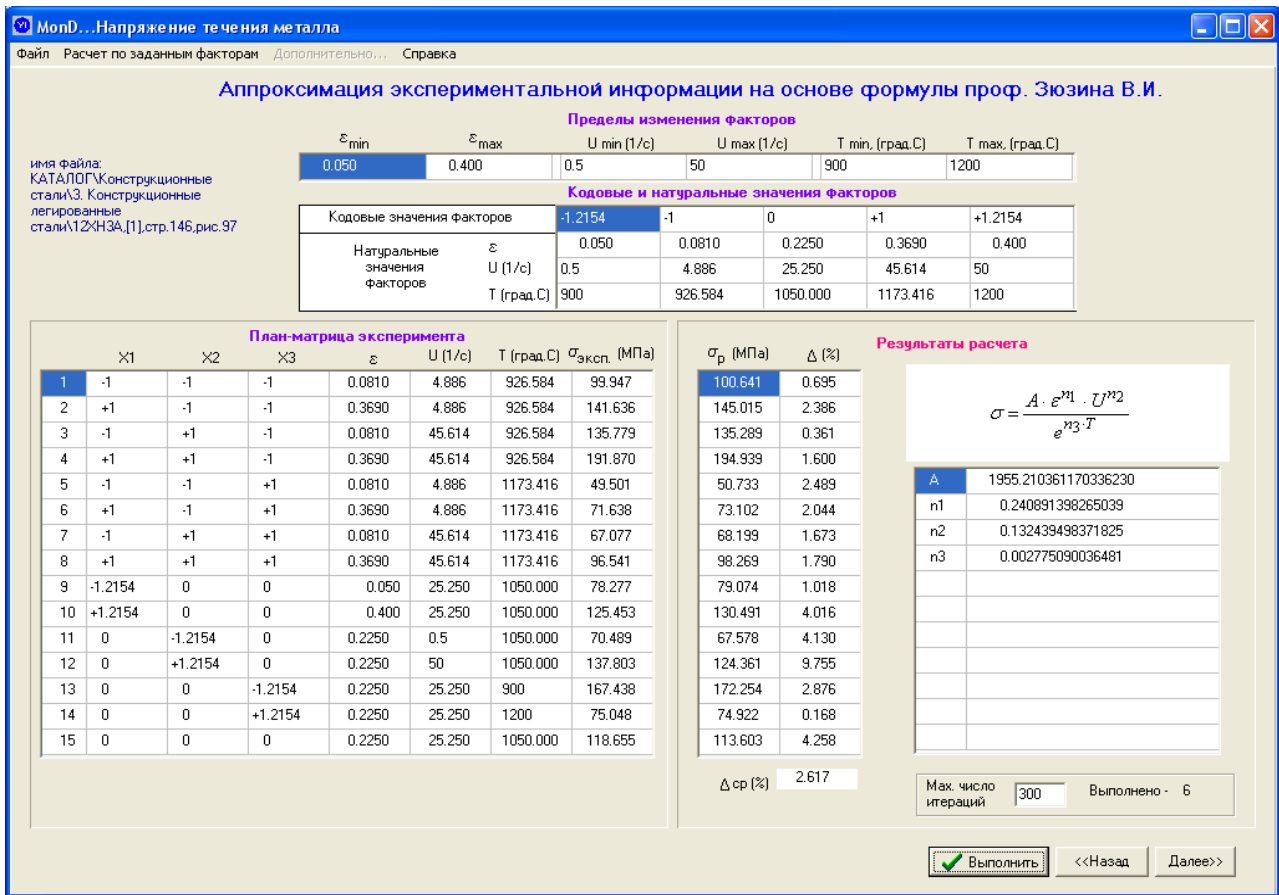


Рис. 1. Окно программы расчета констант, входящих в формулу (1)

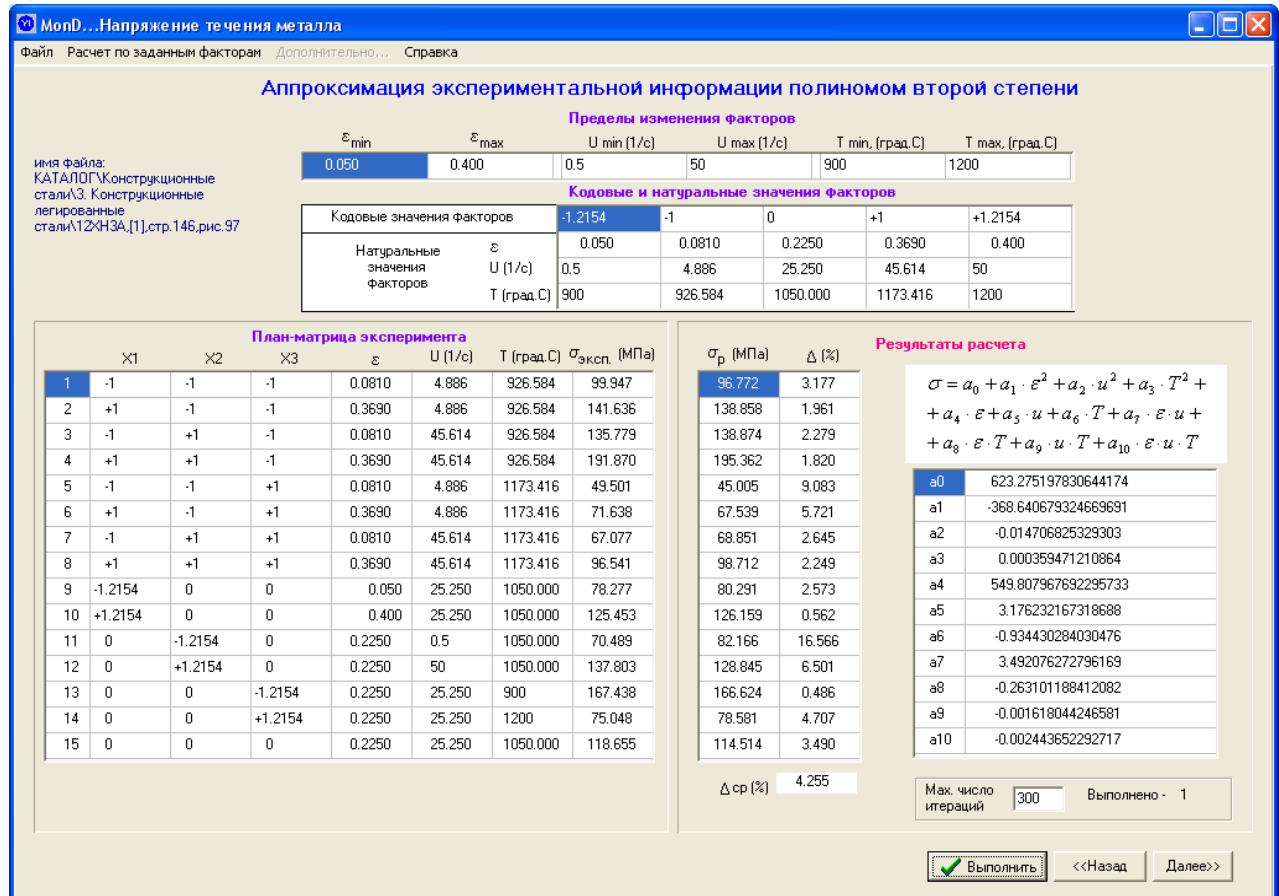


Рис. 2. Окно программы расчета констант, входящих в формулу (5)

Таблица 3

Результаты расчета констант, входящих в формулу (1)

Марка стали	A , МПа	n_1	n_2	n_3	Δ , %
У8, [6], стр. 156, рис. 107	1821,0	0,23300	0,19600	0,0029400	2,2
У12А, [6], стр. 159, рис. 111	1447,9	0,24025	0,15444	0,0024765	8,3
У12А, [7], стр. 83, рис. 33	5951,3	0,18979	-0,15356	0,0033040	10,0
Х17Н2, [6], стр. 200, рис. 164	6453,8	0,25152	0,06584	0,0036560	3,2
Х12, [6], стр. 185, рис. 139	2882,3	0,22104	0,07650	0,0025331	3,1
ХВГ, [6], стр. 137, рис. 79	3472,5	0,25561	0,13761	0,0029445	4,2
ХВГ, [7], стр. 85, рис. 35	4279,3	0,28837	0,13308	0,0030085	5,1
Р18, [6], стр. 168, рис. 128	4834,5	0,16290	0,06750	0,0030983	5,1
Р18, [6], стр. 169, рис. 130	3118,4	0,20879	0,12924	0,0028369	2,1
Ст3, [6], стр. 101, рис. 22	1846,1	0,23057	0,15210	0,0028402	2,3
Сталь 45, [6], стр. 105, рис. 28	1935,6	0,27336	0,17505	0,0028004	16,4
Сталь 45, [6], стр. 105, рис. 29	1733,1	0,23969	0,14375	0,0027614	3,1
Сталь 55, [6], стр. 108, рис. 37	2250,6	0,23481	0,15406	0,0029966	2,0
12ХН3А, [6], стр. 146, рис. 97	1955,2	0,24089	0,13244	0,0027751	2,6
14ГН, [6], стр. 119, рис. 49	2055,7	0,24508	0,15734	0,0028744	2,5
15СХНД, [6], стр. 133, рис. 71	1871,5	0,25049	0,16055	0,0028060	2,5
18ХНВА, [6], стр. 137, рис. 80	3126,2	0,29523	0,10937	0,0027974	3,9
18ХНВА, [7], стр. 87, рис. 37	12113,6	0,25072	-0,11248	0,0036710	11,5
40Х, [6], стр. 122, рис. 52	2183,9	0,24376	0,14499	0,0029576	3,5
60С2, [6], стр. 161, рис. 114	2174,9	0,20983	0,15854	0,0028432	2,7
60С2, [6], стр. 161, рис. 113	3546,3	0,21555	0,08984	0,0032892	3,8
60С2 [7], стр. 84, рис. 34	4148,2	0,24700	0,07593	0,0032819	3,5
ШХ15, [6], стр. 163, рис. 118	1855,2	0,21926	0,15687	0,0028206	2,7
2Х18Н9, [7], стр. 89, рис. 39	2365,2	0,26430	0,11194	0,0022885	4,1
4Х13, [7], стр. 86, рис. 36	2146,6	0,25424	0,07646	0,0019760	4,3
10Х17Н13М2Т, [6], стр. 219, рис. 192	7018,7	0,27233	0,03964	0,0030591	6,0
10Х17Н13М2Т, [6], стр. 221, рис. 195	2685,0	0,23885	0,14783	0,0027323	1,9
12Х13, [6], стр. 186, рис. 141	11889,9	0,29699	0,08867	0,0041241	6,6
12Х13, [6], стр. 187, рис. 142	3491,1	0,25718	0,16121	0,0031423	4,6
12Х18Н9Т, [6], стр. 207, рис. 177	2394,2	0,25237	0,07633	0,0025765	2,8
12Х18Н9Т, [6], стр. 211, рис. 181	4234,0	0,25968	0,07041	0,0026974	4,7
20Х23Н18, [6], стр. 223, рис. 199	9230,2	0,26303	0,09778	0,0036406	8,0
40Х13, [6], стр. 190, рис. 149	5602,1	0,24724	0,06111	0,0035183	3,2
40Х13, [6], стр. 191, рис. 150	3394,2	0,20741	0,10326	0,0028074	4,5
Х18Н9Т, [7], стр. 88, рис. 38	4017,1	0,21782	0,10130	0,0029308	5,2
Х18Н25С2, [6], стр. 225, рис. 202	6969,8	0,17122	0,05129	0,0032477	6,2

Результаты расчета констант, входящих в формулу (5)

Марка стали	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9	a_{10}	$\Delta, \%$
У8, [6], стр. 156, рис. 107	971,79	-117,73	-0,019373	0,000681	380,10	3,523	-1,6063	6,732	-0,23269	-0,0016206	-0,0047786	4,7
У12А, [6], стр. 159, рис. 111	1013,38	-179,65	-0,002575	0,000684	299,47	1,204	-1,6464	5,664	-0,10009	-0,0002870	-0,0047221	6,4
У12А, [7], стр. 83, рис. 33	361,11	-1934,60	0,005728	-0,000002	867,60	-1,794	-0,2810	-0,152	-0,03788	0,0005897	-0,0006526	15,2
Х17Н2, [6], стр. 200, рис. 164	911,22	-530,42	-0,012062	0,000517	781,26	2,203	-1,3648	3,733	-0,40020	-0,0011977	-0,0025991	3,2
Х12, [6], стр. 185, рис. 139	2361,99	-68,81	-0,004431	0,001669	667,65	0,363	-3,9161	1,992	-0,41832	0,0005091	-0,0014959	5,4
ХВГ, [6], стр. 137, рис. 79	2957,95	-200,75	-0,006177	0,002298	1053,76	1,680	-5,1827	0,049	-0,73653	-0,0003474	0,0005761	9,8
ХВГ, [7], стр. 85, рис. 35	3227,27	-241,81	-0,005607	0,002511	1264,07	1,390	-5,6576	1,562	-0,90406	-0,0002568	-0,0001453	8,8
Р18, [6], стр. 168, рис. 128	1536,33	-390,54	-0,062706	0,000919	431,37	13,648	-2,3422	18,893	-0,13890	-0,0089260	-0,0095226	0,8
Р18, [6], стр. 169, рис. 130	1206,42	-195,12	-0,029542	0,000717	695,37	3,677	-1,8295	3,776	-0,42954	-0,0010825	-0,0025322	4,4
Ст3, [6], стр. 101, рис. 22	806,16	-135,60	-0,016365	0,000508	397,36	2,382	-1,2601	4,098	-0,23401	-0,0008692	-0,0026443	4,8
Сталь 45, [6], стр. 105, рис. 28	783,58	-437,71	-0,001826	0,000479	757,46	1,718	-1,2327	-0,430	-0,39957	-0,0007308	0,0010493	8,8
Сталь 45, [6], стр. 105, рис. 29	758,10	-246,46	-0,012169	0,000474	482,88	1,559	-1,1833	4,413	-0,26031	-0,0002575	-0,0032080	4,4
Сталь 55, [6], стр. 108, рис. 37	920,66	-132,88	-0,017421	0,000594	396,35	2,677	-1,4614	5,093	-0,22086	-0,0009506	-0,0039443	4,5
12ХН3А, [6], стр. 146, рис. 97	623,28	-368,64	-0,014707	0,000359	549,81	3,176	-0,9344	3,492	-0,26310	-0,0016180	-0,0024437	4,3
14ГН, [6], стр. 119, рис. 49	844,26	-117,00	-0,016021	0,000527	415,08	2,279	-1,3167	5,675	-0,24186	-0,0006316	-0,0043089	4,4
15СХНД, [6], стр. 133, рис. 71	773,95	-129,56	-0,015768	0,000473	403,76	1,869	-1,1936	6,883	-0,22978	-0,0003161	-0,0052415	4,9
18ХНВА, [6], стр. 137, рис. 80	2026,10	-427,65	-0,004213	0,001479	615,59	1,419	-3,4401	2,681	-0,23134	-0,0004947	-0,0017936	8,7
18ХНВА, [7], стр. 87, рис. 37	1063,21	-1728,48	0,003461	0,000568	1230,83	-1,526	-1,5319	3,135	-0,39259	0,0005711	-0,0033580	8,9
40Х, [6], стр. 122, рис. 52	647,31	-130,87	-0,018208	0,000360	316,75	3,606	-0,9510	4,513	-0,15923	-0,0020224	-0,0028410	5,1
60С2, [6], стр. 161, рис. 114	869,30	-125,30	-0,018206	0,000502	395,81	2,751	-1,3010	6,733	-0,22807	-0,0008681	-0,0049790	4,1
60С2, [6], стр. 161, рис. 113	1766,60	-153,81	-0,002393	0,001276	371,41	0,979	-2,9770	1,123	-0,19894	-0,0003961	-0,0006674	4,8
60С2 [7], стр. 84, рис. 34	1572,59	-298,19	-0,001933	0,001123	575,59	1,033	-2,6333	1,637	-0,30368	-0,0005012	-0,0012188	3,7
ШХ15, [6], стр. 163, рис. 118	792,46	-162,11	-0,012802	0,000487	316,46	2,319	-1,2236	9,614	-0,14116	-0,0008038	-0,0079710	4,2
2Х18Н9, [7], стр. 89, рис. 39	2521,91	-369,18	-0,005893	0,001792	591,16	1,294	-4,2186	0,179	-0,15333	0,0000523	0,0001038	8,7
4Х13, [7], стр. 86, рис. 36	2755,96	-749,54	-0,003478	0,002081	1061,77	0,094	-4,7245	6,823	-0,48056	0,0006962	-0,0054642	4,1
10Х17Н13М2Т, [6], стр. 219, рис. 192	735,59	-506,13	-0,002576	0,000150	1236,58	1,735	-0,7566	-1,965	-0,69106	-0,0010672	0,0022645	3,3
10Х17Н13М2Т, [6], стр. 221, рис. 195	1257,16	-184,28	-0,028750	0,000791	605,52	3,023	-1,9635	8,573	-0,35592	-0,0005825	-0,0061543	4,4
12Х13, [6], стр. 186, рис. 141	1727,97	-515,86	-0,066632	0,001244	627,32	24,993	-2,9165	21,584	-0,27793	-0,0207220	-0,0080364	2,0
12Х13, [6], стр. 187, рис. 142	1138,39	-163,12	-0,025339	0,000670	483,53	1,799	-1,7426	9,773	-0,23480	0,0006653	-0,0086492	4,3
12Х18Н9Т, [6], стр. 207, рис. 177	1003,69	-615,22	-0,012176	0,000658	884,41	3,440	-1,6001	-3,650	-0,42473	-0,0020676	0,0036643	3,3
12Х18Н9Т, [6], стр. 211, рис. 181	1889,19	-532,68	-0,003032	0,001210	921,48	1,179	-2,9902	1,919	-0,40154	-0,0003034	-0,0013529	4,6
20Х23Н18, [6], стр. 223, рис. 199	2986,63	-426,26	-0,156398	0,002202	725,38	-7,246	-5,1001	60,347	-0,38106	0,0102688	-0,0389154	2,3
40Х13, [6], стр. 190, рис. 149	857,42	-544,18	-0,009708	0,000482	812,35	2,432	-1,2781	0,584	-0,41586	-0,0014521	-0,0001192	3,7
40Х13, [6], стр. 191, рис. 150	2052,57	-393,28	-0,003381	0,001418	575,52	2,260	-3,3689	0,740	-0,25155	-0,0012538	0,0000705	5,7
Х18Н9Т, [7], стр. 88, рис. 38	1919,82	-408,98	-0,003145	0,001285	616,15	2,574	-3,1008	-0,570	-0,28577	-0,0015789	0,0014448	5,2
Х18Н25С2, [6], стр. 225, рис. 202	1810,36	-639,99	0,100446	0,001078	1257,14	2,269	-2,7517	-70,439	-0,80171	0,0000092	0,0761921	0,9

Таблица, содержащая информацию для ее аппроксимации функцией (1), всегда содержит 15 опытов (см. рис. 1). Причем это научно-обоснованный теорией планируемого эксперимента минимум опытов. Значения констант, входящих в формулу (1), получены в правой части окна (см. рис. 1) по методу наименьших квадратов.

На рис. 1 в центральной части окна в таблице представлена экспериментальная и расчетная информация для величин σ в точках, соответствующих план-матрице.

Среднее относительное отклонение расчетных значений σ , найденных на базе констант, которые определены по методу [1] (см. табл. 1), от соответствующих экспериментальных значений, представленных на рис. 1, равно 2,9%. Аналогичное отклонение при расчетах величин σ на базе констант, которые определены по методу [2, 3] (см. рис. 1), равно 2,6%. То есть, получены близкие результаты. Это свидетельствует о том, что метод [2, 3], требующий определения экспериментальных значений σ в 15-ти точках, может также использоваться для получения рабочих эмпирических формул для расчета напряжения течения металла.

Используя экспериментальную информацию по кривым упрочнения, содержащуюся в работах [6, 7], на основе метода [2, 3] в окнах компьютерной программы (см. рис. 1, рис. 2) были определены константы формулы (1) (см. табл. 3) и константы формулы (5) (см. табл. 4).

ВЫВОДЫ

Разработка нового метода и компьютерной программы, окна которой представлены на рис. 1–2, позволили на основе экспериментальной пластометрической информации по кривым упрочнения определить константы формул (1) и (5) для расчета напряжения течения металла σ в зависимости от ε, U, T для 36 марок конструкционных, инструментальных и нержавеющей сталей. Средняя относительная ошибка аппроксимации экспериментальной информации для всех марок сталей по формуле (1) составила 4,7%, а по полиному (5) – 5,2%.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Теория прокатки : справочник / А. И. Целиков, А. Д. Томленов, В. И. Зюзин, А. В. Третьяков, Г. С. Никитин. – М. : Металлургия, 1982. – 335 с.
2. Яковченко А. В. Определение напряжения течения металла с учетом истории процесса нагружения на основе уравнения А. Надаи / А. В. Яковченко, Н. И. Ивлева, А. А. Пугач // Наукові праці ДонНТУ. Металургія. – 2011. – Вип. 12 (177). – С. 181–193.
3. Яковченко А. В. Анализ точности известных методов расчета напряжения течения металла в зависимости от химического состава стали / А. В. Яковченко, А. А. Пугач, Н. И. Ивлева // Вісник Приазовського державного технічного університету : зб. наук. пр. – Маріуполь : ПДТУ, 2011. – Вип. 2(23). – С. 69–80. – (Серія «Технічні науки»).
4. Данилов А. В. Анализ и усовершенствование методов расчета напряжения течения металла в процессах горячей пластической деформации / А. В. Данилов // Металлургия и обработка металлов : материалы научно-исследовательских работ студентов и молодых ученых физико-металлургического факультета ДонНТУ. – Донецк : ДонНТУ, 2009. – Выпуск 12. – С. 42–43.
5. Винарский М. С. Планирование эксперимента в технологических исследованиях : учебное пособие / М. С. Винарский, М. В. Лурье. – К. : Техника, 1975. – 168 с.
6. Полухин П. И. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов : справочник / П. И. Полухин, Г. Я. Гун, А. М. Галкин. – М. : Металлургия, 1983. – 352 с.
7. Применение теории ползучести при обработке металлов давлением / Поздеев А. А., Тарновский В. И., Еремеев В. И., Баакашвили В. С. – М. : Металлургия, 1973. – 192 с.

Яковченко А. В. – д-р техн. наук, проф. ДонНТУ;

Пугач А. А. – магистр ДонНТУ;

Ивлева Н. И. – программист ДонНТУ.

ДонНТУ – Донецкий национальный технический университет, г. Донецк.

E-mail: mond1991@mail.ru

Статья поступила в редакцию 06.03.2012 г.