

УДК 621.771

А.В. Яковченко, А.А. Пугач, Н.И. Ивлева<sup>1</sup>

### АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ ИЗВЕСТНЫХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА НАПРЯЖЕНИЯ ТЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА СТАЛИ

*Разработана компьютерная программа расчета напряжения течения металла на основе сплайн-интерполяции экспериментальной информации. На базе теории планируемого эксперимента создана компьютерная программа для оценки точности известных методов расчета напряжения течения металла. Выполнен анализ точности методов Николаева В.А. и Андреюка Л.В., Тюленева Г.Г., Прицкера В.С.*

**Ключевые слова:** анализ точности методов расчета напряжения течения металла; сплайн-интерполяция экспериментальной информации; компьютерная программа.

*О.В. Яковченко, О.А. Пугач, Н.И. Ивлева Аналіз точності відомих методів розрахунку напруги плину металу залежно від хімічного складу сталі. Розроблено комп'ютерну програму розрахунку напруги плину металу на основі сплайн - інтерполяції експериментальної інформації. На базі теорії планованого експерименту створена комп'ютерна програма для оцінки точності відомих методів розрахунку напруги плину металу. Виконано аналіз точності методів Ніколаєва В.О. і Андреюка Л.В., Тюленєва Г.Г., Прицкера В.С.*

**Ключові слова:** аналіз точності методів розрахунку напруги плину металу; сплайн-інтерполяція експериментальної інформації; комп'ютерна програма.

*A.V.Yakovchenko, A.A.Pugach, N.I. Ivleva . The Analysis of Exactness of the Known Methods of Calculation of Tension of Flow of Metal, Depending on Chemical Composition of Steel. The computer program of calculation of tension of flow of metal is developed on the basis of spline-interpolation of experimental information. On the base of the theory of the planned experiment the computer program is created for the estimation of exactness of the known methods of calculation of tension of flow of metal in relation to experimental information. The analysis of exactness of Nikolaev V.A. and Andreyuk I.V., Tyulenev G.G., Pricker V.S. methods was executed.*

**Keywords:** analysis of exactness of methods of calculation of tension of flow of metal; spline-interpolation of experimental information; computer program.

**Постановка проблемы.** Актуальной проблемой является выполнение научно обоснованного анализа точности существующих методов расчета напряжения металла.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Исследования напряжения течения металла  $\sigma$  имеют важное значение для теории и практики обработки металлов давлением. Этой теме посвящено значительное количество работ, вместе с тем, вопросы точности созданных методов расчета напряжения течения металла остаются актуальными. Особый интерес представляет анализ точности методов Николаева В.А. [1] и Андреюка Л.В., Тюленева Г.Г., Прицкера В.С. [2], которые позволяют выполнить расчет величины  $\sigma$  в зависимости от химического состава стали, в том числе, когда отсутствует соответствующая экспериментальная пластометрическая информация.

**Цель работы** – выполнить оценку точности методов [1] и [2] для конструкционных, инструментальных и нержавеющей сталей.

**Изложение основного материала.** Метод определения величины  $\sigma$  в зависимости от произвольных значений степени деформации  $\epsilon$ , скорости деформации  $U$  и температуры  $T$  на

<sup>1</sup> Яковченко А.В. – д-р. техн. наук, профессор; Пугач А.А. - магистр; Ивлева Н.И. - программист, ГВУЗ "Донецкий национальный технический университет", Донецк, Украина



Рассчитанные в окне рис.3 величины  $\sigma$  при текущих значениях  $\epsilon$ ,  $U$ ,  $T$  автоматически передаются в соответствующую таблицу окна на рис. 4. Метод расчета подробно изложен в работе [3].

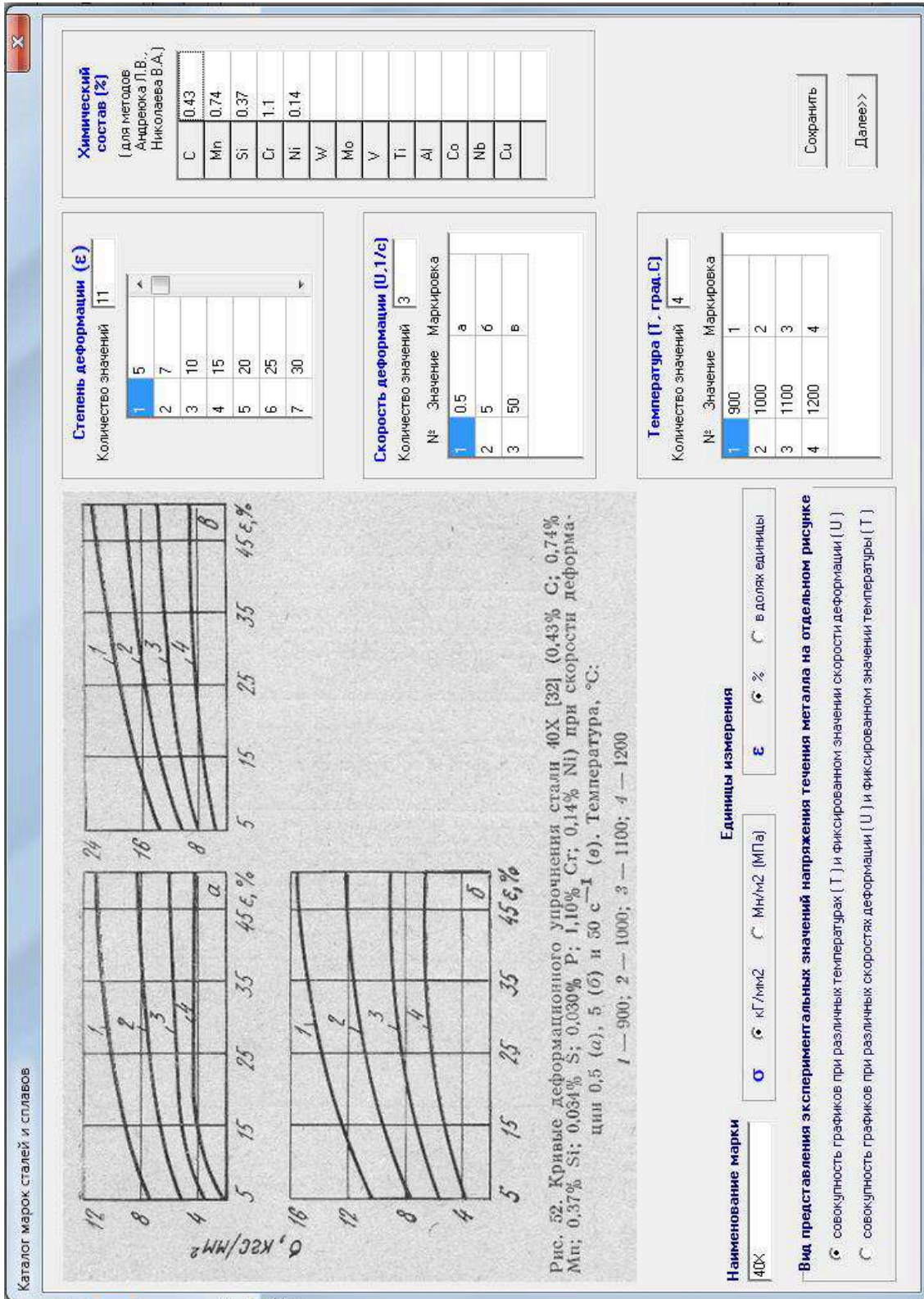


Рис. 1 - Окно исходной информации

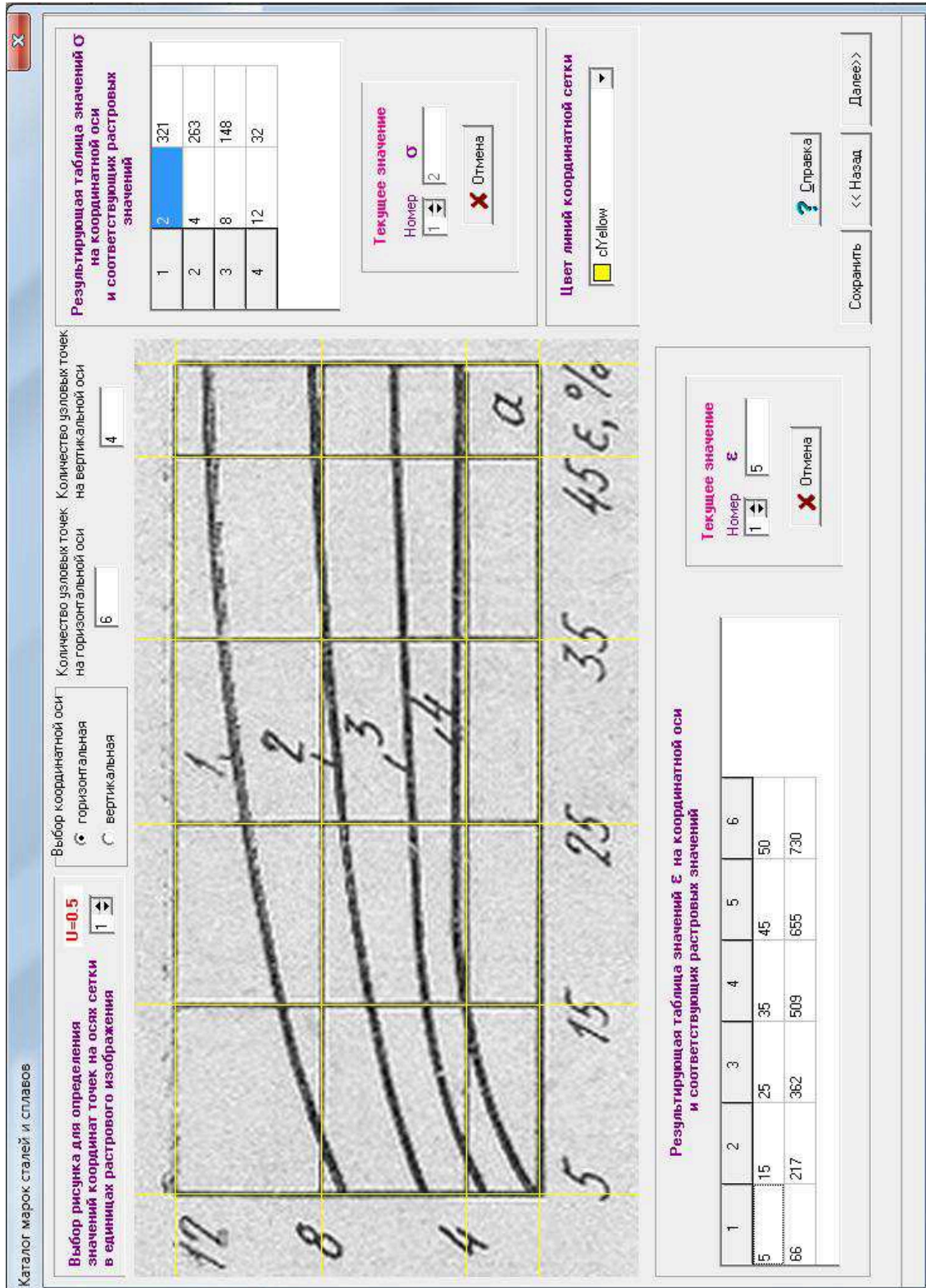


Рис. 2 - Окно построения координатной сетки

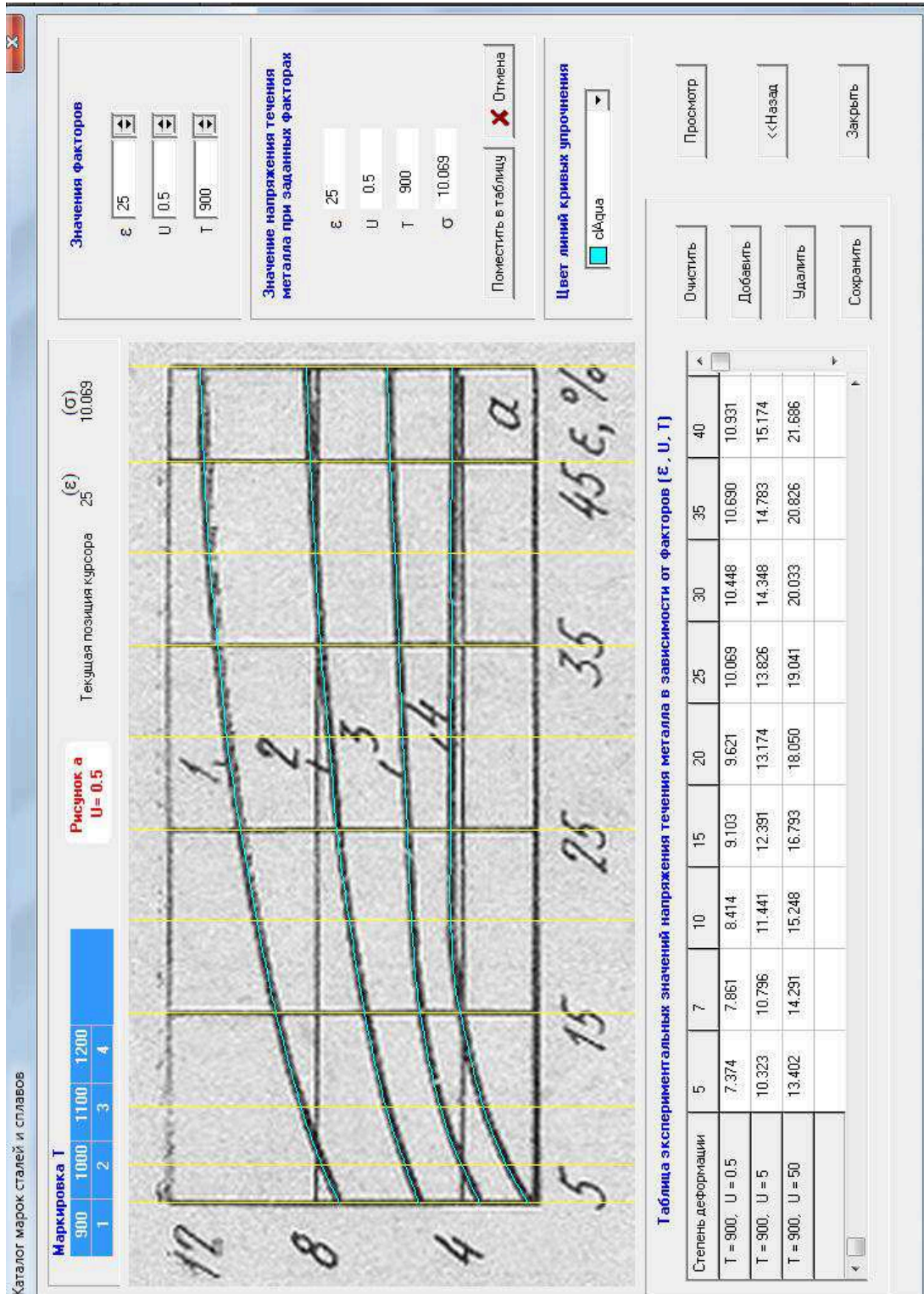


Рис. 3 - Окно снятия экспериментальной информации и контрольного построения слайд – кривых

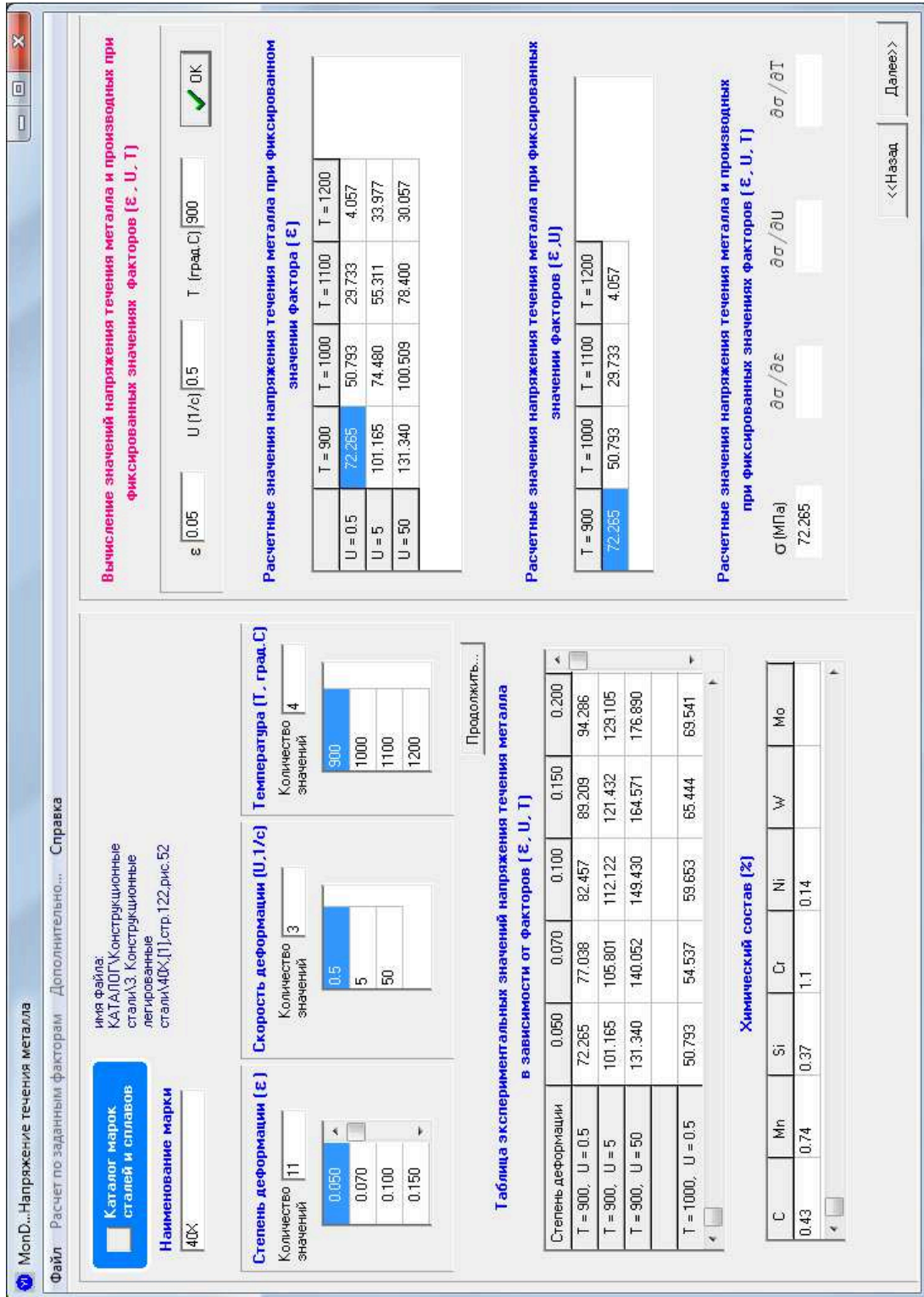


Рис. 4 - Окно расчета напряжения течения металла при фиксированных значениях скорости деформации, степени деформации и температуры на основе экспериментальной информации



Установлено, что средняя относительная погрешность метода Николаева В.А. [1] составила 14,5% (максимальная относительная погрешность (для стали Р18, см. таблицу 2) равна 32,3%). Средняя относительная погрешность по методу Андреюка Л.В. и др. [2] составила 21,2% (максимальная относительная погрешность (для стали Р18, см. таблицу 2) равна 67%). Указанные результаты

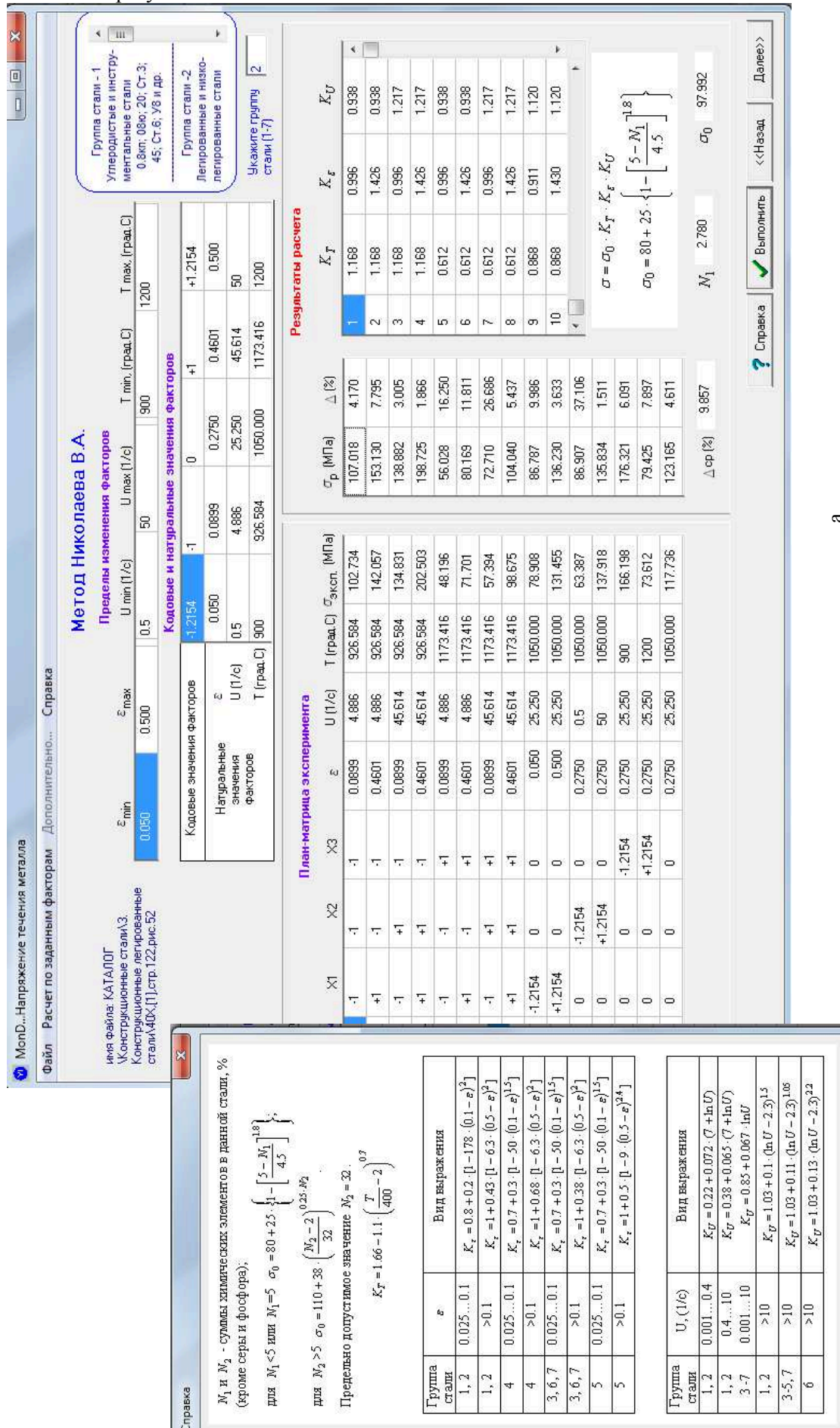


Рис. 5. Окна программы для выполнения анализа точности метода Николаева В.А.: а - план-матрица эксперимента для стали 40Х; б - основные формулы



Метод Андрюка Л.В., Тюленева Г.Г., Прицкера В.С.  
 Пределы изменения факторов

Имя файла: КАТАЛОГ  
 Конструкционные стали.3  
 Конструкционные легированные стали\40X.[1]стр.122.рис.52

Пределы изменения факторов

$\sigma_{\min}$	0.050	$\sigma_{\max}$	0.500	$T_{\min}$ (град.С)	50	$T_{\max}$ (град.С)	1200
$\epsilon_{\min}$	0.050	$\epsilon_{\max}$	0.500	$U_{\min}$ (1/с)	0.5	$U_{\max}$ (1/с)	900

Кодовые и натуральные значения факторов

Кодовые значения факторов	$\epsilon$	$U$ (1/с)	$T$ (град.С)	$\sigma_{\text{исп.}}$ (МПа)
1	-1.2154	-1	0	+1
2	0.050	0.0899	0.2750	0.4601
3	0.5	4.886	25.250	45.614
4	900	926.584	1050.000	1173.416

План-матрица эксперимента

	X1	X2	X3	$\epsilon$	$U$ (1/с)	$T$ (град.С)	$\sigma_{\text{исп.}}$ (МПа)
1	-1	-1	-1	0.0899	4.886	926.584	102.734
2	+1	-1	-1	0.4601	4.886	926.584	142.057
3	-1	+1	-1	0.0899	45.614	926.584	134.831
4	+1	+1	-1	0.4601	45.614	926.584	202.503
5	-1	-1	+1	0.0899	4.886	1173.416	48.196
6	+1	-1	+1	0.4601	4.886	1173.416	71.701
7	-1	+1	+1	0.0899	45.614	1173.416	57.394
8	+1	+1	+1	0.4601	45.614	1173.416	98.675
9	-1.2154	0	0	0.050	25.250	1050.000	78.908
10	+1.2154	0	0	0.500	25.250	1050.000	131.455
11	0	-1.2154	0	0.2750	0.5	1050.000	63.387
12	0	+1.2154	0	0.2750	50	1050.000	137.918
13	0	0	-1.2154	0.2750	25.250	900	166.198

Исходная информация

Наименование марки: 40X

C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V	Ti	Al	Co	Nb	Cu
0.43	0.74	0.37	1.1	0.14							

Примечание:  
 Содержание азота может изменяться в пределах 0.04 - 1.2%; содержание остальных элементов может достигать:  
 14% Mn, 4% Si, 24% Cr, 76% Ni, 1% V, 3% Ti, 5% Al, 15% Co, 1% Nb, 2% Cu.

Результаты расчета

$$\sigma = N \cdot U^A \cdot (10 \cdot \epsilon)^B \left( \frac{T}{1000} \right)^C$$

N	88.577
A	0.136
B	0.208
C	-3.125

$\sigma_p$  (МПа)     $\Delta$  (%)

125.337	22.001
175.994	23.890
169.723	25.878
238.319	17.887
59.921	24.327
84.139	17.347
81.141	41.375
113.936	15.465
93.804	18.878
151.399	15.172
78.521	23.875
146.684	6.363
216.440	30.230
88.091	19.669
133.704	13.562

$\Delta$  ср (%)    21.048  
 2/3 степени деформ.

Выполнить    <<Назад    Далее>>

а

Рис. 6. Окна программы для выполнения анализа точности метода Андрюка Л. В. и др.:  
 а- план-матрица эксперимента для стали 40X; б- фрагмент окна для задания исходной информации

б

Таблиця 2

Средняя относительная погрешность при расчете величины  $\sigma$  по методам [1] и [2]

Обозначение марки стали, номер страницы, номер рисунка в работе [5]	Назначение стали	Пределы измерения факторов		$\Delta_{ср}$ , %	
		$\varepsilon$	U, с <sup>-1</sup>	[1]	[2]
Ст3, стр.101, рис.22	конструкционная обыкновенного качества	0,05-0,5	0,5-50	6,56	4,97
Сталь 45, стр.105, рис.28	конструкционная нелегированная качественная	0,05-0,5	0,05-150	18,20	18,39
Сталь 45, стр.105, рис.29	конструкционная нелегированная качественная	0,05-0,4	0,5-50	5,35	7,83
Сталь 55, стр.108, рис.37	конструкционная нелегированная качественная	0,05-0,5	0,5-50	7,56	4,34
12ХН3А, стр.146, рис.97	конструкционная легированная	0,05-0,4	0,5-50	12,19	24,95
14ГН, стр.119, рис.49	конструкционная легированная	0,05-0,5	0,5-50	6,23	13,19
15СХНД, стр.133, рис.71	конструкционная легированная	0,05-0,5	0,5-50	7,54	10,04
18ХНВА, стр.137, рис.80	конструкционная легированная	0,05-0,45	0,05-150	14,52	8,90
40Х, стр.122, рис.52	конструкционная легированная	0,05-0,5	0,5-50	9,86	21,05
60С2, стр.161, рис.114	конструкционная легированная	0,05-0,5	0,5-50	12,00	12,54
60С2, стр.161, рис.113	конструкционная легированная	0,05-0,5	0,05-150	9,57	12,45
ШХ15, стр.163, рис.118	конструкционная подшипниковая	0,05-0,5	0,5-50	7,78	26,87
У8, стр.156, рис.107	инструментальная нелегированная углеродистая	0,05-0,5	0,5-50	10,05	12,47
У12А, стр.159, рис.111	инструментальная нелегированная углеродистая	0,05-0,4	0,05-150	11,49	10,94
Х17Н2, стр.200, рис.164	инструментальная легированная	0,05-0,4	0,5-50	12,52	38,14
Х12, стр.185, рис.139	инструментальная легированная	0,05-0,4	0,05-150	30,03	21,88
ХВГ, стр.137, рис.79	инструментальная легированная	0,05-0,5	0,05-150	28,97	22,17
Р18, стр.168, рис.128	инструментальная быстрорежущая	0,05-0,5	0,05-7,5	32,32	29,89
Р18, стр.169, рис.130	инструментальная быстрорежущая	0,05-0,5	0,5-50	23,70	66,96
10Х17Н13М2Т, стр.219, рис.192	нержавеющая	0,05-0,5	0,05-150	13,91	17,70
10Х17Н13М2Т, стр.221, рис.195	нержавеющая	0,05-0,5	0,5-50	7,96	28,50
12Х13, стр.186, рис.141	нержавеющая	0,05-0,4	0,05-7,5	17,79	22,32
12Х13, стр.187, рис.142	нержавеющая	0,05-0,5	0,5-50	10,54	15,74
12Х18Н9Т, стр.207, рис.177	нержавеющая	0,05-0,4	0,5-50	3,69	55,16

12X18H9T, стр.211, рис.181	нержавеющая	0,05-0,5	0,05-150	30,01	11,56
40X13, стр.190, рис.149	нержавеющая	0,05-0,4	0,5-50	11,54	44,75
40X13, стр.191, рис.150	нержавеющая	0,05-0,4	0,05-150	29,53	9,39

Пределы изменения температуры по всем маркам сталей- (800 - 1200)°С

по методу [2] получены с учетом 2/3 ε. Следует отметить, что в работе [2], в которой изложен метод Андреюка Л.В. и др., данная рекомендации отсутствует, но она имеется в работе авторов [6], что явилось основанием для ее использования. Установлено, что без учета этой рекомендации средняя относительная погрешность метода [2] составила 26,4%. В процессе выполнения расчетов для рассмотренных марок сталей был определен ряд констант, входящих в расчетные формулы методов [1] и [2], которые представлены в таблице 3.

Таблица 3

Константы, входящие в формулы расчета напряжения течения металла σ по методам [1] и [2]

Обозначение марки стали, номер страницы, номер рисунка в работе [5]	Пределы изменения факторов		Метод [1] σ <sub>0</sub> , МПа	Метод [2]			
	ε	U, с <sup>-1</sup>		N	A	B	C
Ст3, стр.101, рис.22	0,05-0,5	0,5-50	88,353	74,777	0,134	0,186	-2,957
Сталь 45, стр.105, рис.28	0,05-0,5	0,05-150	91,313	75,195	0,148	0,186	-3,369
Сталь 45, стр.105, рис.29	0,05-0,4	0,5-50	88,353	74,691	0,144	0,193	-3,003
Сталь 55, стр.108, рис.37	0,05-0,5	0,5-50	90,460	75,783	0,143	0,199	-2,977
12ХН3А, стр.146, рис.97	0,05-0,4	0,5-50	104,924	100,273	0,116	0,185	-2,806
14ГН, стр.119, рис.49	0,05-0,5	0,5-50	98,928	90,933	0,124	0,190	-3,065
15СХНД, стр.133, рис.71	0,05-0,5	0,5-50	98,274	86,713	0,117	0,185	-2,943
18ХНВА, стр.137, рис.80	0,05-0,45	0,05-150	111,419	100,720	0,119	0,206	-2,954
40Х, стр.122, рис.52	0,05-0,5	0,5-50	97,992	88,577	0,136	0,208	-3,125
60С2, стр.161, рис.114	0,05-0,5	0,5-50	101,825	76,032	0,149	0,207	-3,166
60С2, стр.161, рис.113	0,05-0,5	0,05-150	100,711	72,959	0,154	0,203	-3,211
ШХ15, стр.163, рис.118	0,05-0,5	0,5-50	100,050	94,082	0,152	0,202	-3,173
У8, стр.156, рис.107	0,05-0,5	0,5-50	91,769	77,800	0,150	0,198	-2,992
У12А, стр.159, рис.111	0,05-0,4	0,05-150	91,542	80,509	0,158	0,173	-2,987
Х17Н2, стр.200, рис.164	0,05-0,4	0,5-50	112,357	123,742	0,116	0,118	-3,597
Х12, стр.185, рис.139	0,05-0,4	0,05-150	111,227	140,380	0,148	0,144	-3,711
ХВГ, стр.137, рис.79	0,05-0,5	0,05-150	104,619	82,604	0,157	0,222	-3,432
Р18, стр.168, рис.128	0,05-0,5	0,05-7,5	114,492	195,135	0,151	0,117	-3,985
Р18, стр.169, рис.130	0,05-0,5	0,5-50	115,059	210,405	0,122	0,076	-2,409
10Х17Н13М2Т, стр.219, рис.192	0,05-0,5	0,05-150	158,669	179,823	0,103	0,107	-3,140
10Х17Н13М2Т, стр.221, рис.195	0,05-0,5	0,5-50	139,018	168,776	0,097	0,090	-2,716
12Х13, стр.186, рис.141	0,05-0,4	0,05-7,5	111,212	126,520	0,116	0,161	-3,681
12Х13, стр.187, рис.142	0,05-0,5	0,5-50	111,389	126,110	0,110	0,162	-3,657
12Х18Н9Т, стр.207, рис.177	0,05-0,4	0,5-50	123,604	179,336	0,078	0,142	-3,226
12Х18Н9Т, стр.211, рис.181	0,05-0,5	0,05-150	127,422	185,080	0,066	0,121	-3,344
40Х13, стр.190, рис.149	0,05-0,4	0,5-50	111,214	124,682	0,127	0,178	-3,713
40Х13, стр.191, рис.150	0,05-0,4	0,05-150	111,253	126,592	0,127	0,180	-3,720

**Выводы**

Разработка компьютерной программы, окна которой представлены на рис. 1-4, позволила, используя имеющуюся экспериментальную графическую информацию по кривым упрочнения, реализовать метод [3] расчета напряжения течения металла в зависимости от текущих значений факторов ε, U и T.

На базе теории планируемого эксперимента выполнен научно обоснованный анализ точности известных методов расчета напряжения течения металла.

Разработка компьютерной программы, окна которой представлены на рис. 5-6, позволила выполнить оценку точности методов Николаева В.А. [1] и Андреюка Л.В. и др. [2] для 27 конструкционных, инструментальных и нержавеющей сталей, экспериментальная информация для которых предоставлена в работе [5]. Средняя относительная погрешность по методу Николаева В.А. [1] равна 14,5% , по методу Андреюка Л.В. и др. [2] - 21,2%.

По указанной группе из 27 марок сталей получены константы, входящие в расчетные формулы методов Николаева В.А. [1] и Андреюка Л.В. и др. [2] .

**Список использованных источников:**

1. Николаев В.А. Теория прокатки: Монография. - Запорожье: Издательство Запорожской государственной инженерной академии, 2007. - 228с.
2. 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.
3. 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 //Наук. пр. ДонНТУ, сер.Металургія. – Донецьк: ДонНТУ, 2010. – Вип.. 12(177).- С.181-193.
4. Винарский М.С. Планирование эксперимента в технологических исследованиях : учеб. пособие / М.С. Винарский, М.В Лурье. – К.: Техника, 1975. – 168 с.
5. Полухин П.И. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов: Справочник / П.И. Полухин, Г.Я. Гун, А.М. Галкин. – М.: Металлургия, 1983. -352с.
6. Андреюк Л.В. Аналитическая зависимость сопротивления деформации металла от температуры, скорости и степени деформации/Л.В. Андреюк, Г.Г. Тюленев //Сталь. – 1972. - №6. – С. 825-828.

**Bibliography:**

1. Nikolaev V.A. Theory of rolling: Monograph. - Zaporozhia: Publishing house of the Zaporozhia state engineering academy, 2007. - 228p.
2. Andreyuk L.V. Analytical dependence of resistance deformation of steels and alloys on their chemical composition / L.V. Andreyuk, G.G. Tyulenev, B.S. Pricker // Steel. – 1972. – №6. – p. 522, 523.
3. Yakovchenko A.V. Determination of tension of flow of metal taking into account history of process of ladening on the basis of equalization of A.Nadai / A.V.Yakovchenko, N.I.Ivleva, A.A.Pugach //DONNTU – Donetsk: DONNTU, 2010. 12(177) - P.181-193.
4. Vinarskiy M.S. Planning of experiment in technological researches: studies. manual / M.S. Vinarskiy, M.V Lur'e. – K.: of Technician, 1975. – 168p.
5. Polukhin P.I. Resistance the flowage of metals and alloys: Reference book / P.I. Polukhin, G.Y. Gun, A.M. Galkin. – M.: Metallurgy, 1983. -352p.
6. Andreyuk L.V. Analytical dependence of resistance deformation of metal on a temperature, speed and degree of deformation/L.V. Andreyuk, G.G. Tyulenev //Steel. – 1972. - №6. – P. 825-828.

Рецензент: Е.Н. Смирнов  
д-р. техн. наук, проф., ДонНТУ

Статья поступила 30.11.2011