

ОБРОБКА МЕТАЛІВ ТИСКОМ

УДК 621.771

©Яковченко А.В.¹, Пугач А.А.², Ивлева Н.И.³

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.

Яковченко О.В., Пугач О.А., Ивлева Н.И. Аналіз точності відомих методів розрахунку напруги плинну металу залежно від хімічного складу сталі. Розроблено комп'ютерну програму розрахунку напруги плинну металу на основі сплайн - інтерполяції експериментальної інформації. На базі теорії планованого експерименту створена комп'ютерна програма для оцінки точності відомих методів розрахунку напруги плинну 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 плинну металу; сплайн-інтерполяція експериментальної інформації; комп'ютерна програма.

O.V. Yakovchenko, O.A. Pugach, N.I. Ivleva. The Analysis of precision of the existing methods of evaluation of metal flow tension, depending on steel chemical composition. The computer program was developed for calculation of tension of metal flow on the basis of on-line -interpolation of experimental information. On the base of theory of the planned experiment the computer program was created for the estimation of precision of the known methods of calculation of tension of flow of metal in relation to experimental information. The analysis of precision the methods, developed by Nikolaev V.A. and Andreyuk I.V., Tyulenev G.G., Pricker V.S. was executed.

Keywords: analysis of precision icexactness of methods of calculation of metal flow tension on-line -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 σ 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 σ в зависимости от химического состава стали, в том числе, когда отсутствует соответствующая экспериментальная пластомет-

¹ д-р техн. наук, профессор, ГВУЗ "Донецкий национальный технический университет", г. Донецк

² магистр, ГВУЗ "Донецкий национальный технический университет", г. Донецк

³ программист, ГВУЗ "Донецкий национальный технический университет", г. Донецк

рическая информация.

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

Изложение основного материала. Метод определения величины σ в зависимости от произвольных значений степени деформации ϵ , скорости деформации U и температуры T на основе экспериментальных кривых упрочнения предложен в работе [3]. На его основе разработана компьютерная программа, основные окна которой представлены на рис. 1-4. По своей сути эта программа предназначена для создания компьютерной базы данных о напряжении течения сталей и сплавов. В ней создан каталог, в котором на первом этапе марки сталей разделяют по назначению на три группы: конструкционные, инструментальные и нержавеющей. На следующем этапе конструкционные стали разделяют на подгруппы: конструкционные стали обыкновенного качества, нелегированные качественные, легированные, подшипниковые, а инструментальные - на подгруппы: инструментальные нелегированные углеродистые стали, легированные, быстрорежущие. В дальнейшем можно увеличить количество, как групп, так и подгрупп.

В качестве примера рассмотрим процесс ввода в базу данных информации для стали 40X. При этом в каталоге открывается вначале группа «Конструкционные стали», а затем подгруппа «Конструкционные легированные стали» и в соответствующую папку заносится отсканированная графическая информация, включающая кривые упрочнения и подрисовочную надпись (см. рис.1). Параллельно указывается литературный источник, в котором опубликована эта информация, номер страницы и номер рисунка. В окне, представленном на рис.1, указываются единицы измерения для σ , ϵ , U , T , принятые на рисунке, а также вид представления экспериментальной информации. В соответствующих таблицах в правой части окна задаются имеющиеся на графиках количество значений для ϵ , U и T , их величина и маркировка. Задается также химический состав стали, если он указан, например, в подрисовочной надписи. Перечисленная информация является исходной.

На рис.2 показано окно построения координатной сетки. В это окно поочередно подаются рисунки, помеченные буквами а, б, в. Для стали 40X на рис.2 показана кривая упрочнения при $U=0.5 \text{ с}^{-1}$, помеченная буквой а. 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. Сначала вводится количество узловых точек на оси абсцисс. С помощью переключателя выбирается текущее значение ϵ , затем наводится курсор мыши на вертикальную линию, проходящую через соответствующую узловую точку на оси абсцисс рисунка, и выполняется щелчок левой кнопкой мыши. При этом в результирующую таблицу автоматически заносится значение абсциссы узловой точки в единицах растрового изображения, а на самом рисунке вычерчивается вертикальная линия. Аналогичные действия выполняются и для оси ординат. Графическая визуализация построенных линий необходима для обеспечения максимально точного совпадения построенной сетки, которая выполняется другим цветом, с исходной координатной сеткой. При необходимости указанные значения уточняют.

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. Для этого разработано окно программы, показанное на рис.3. В правом верхнем углу окна имеются переключатели для выбора текущих значений ϵ , U , T . На точку графика, соответствующую выбранным факторам, необходимо навести курсор и щелкнуть левой кнопкой "мыши". Программа вычисляет значение напряжения течения металла $\sigma(\epsilon, U, T)$, а после нажатия кнопки "Поместить в таблицу" заносит его в соответствующую ячейку таблицы, вид и размеры которой predeterminedены исходной информацией. В таблице 1 представлена информация о величинах σ для стали марки 40X, полученных на основе вышеизложенного метода.

Далее выполняется сплайн-интерполяция полученной информации и построение сплайн - кривых в окне рис.3. 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 вертикальных координатных линий, соответст -

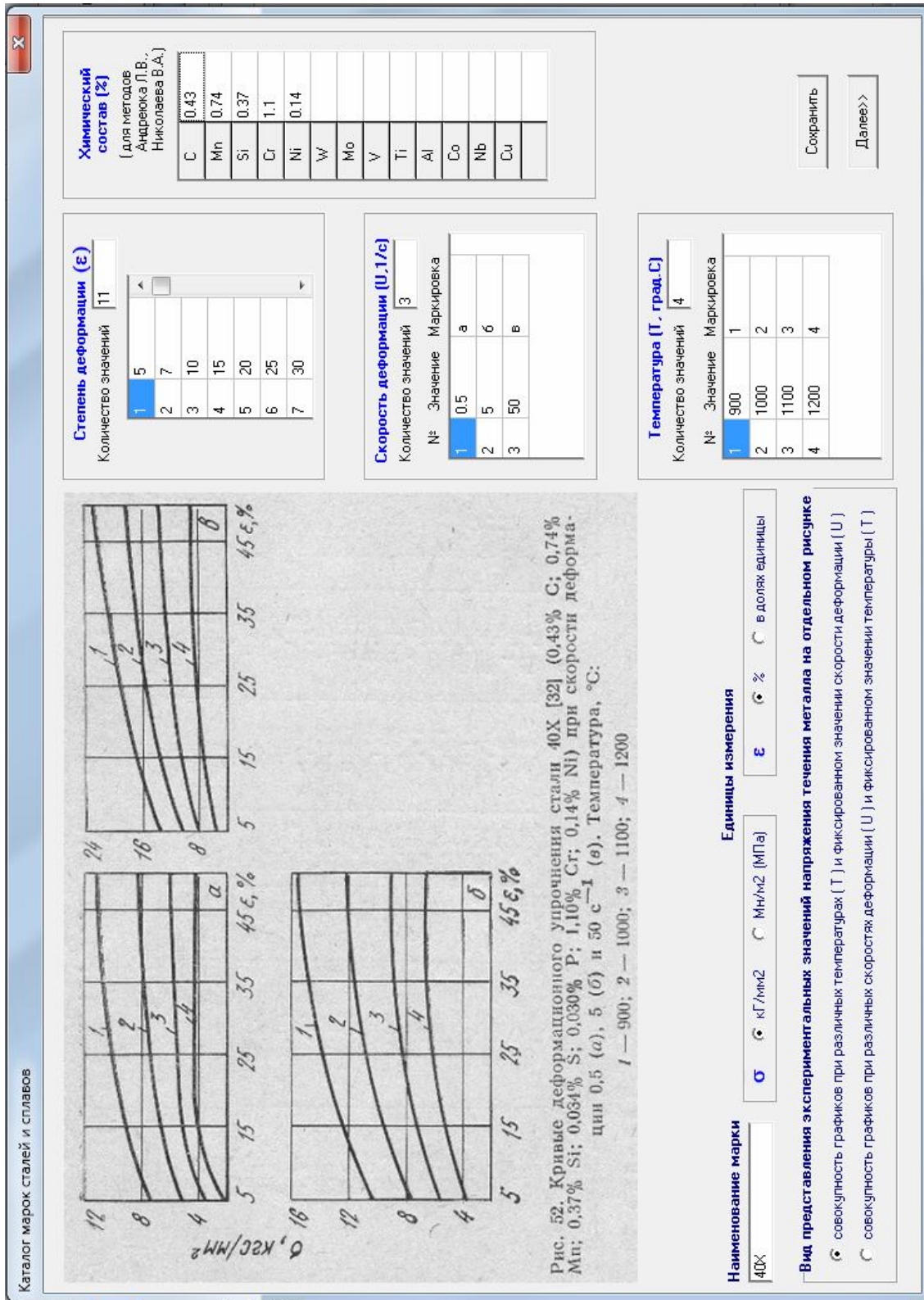


Рис. 1 - Окно исходной информации

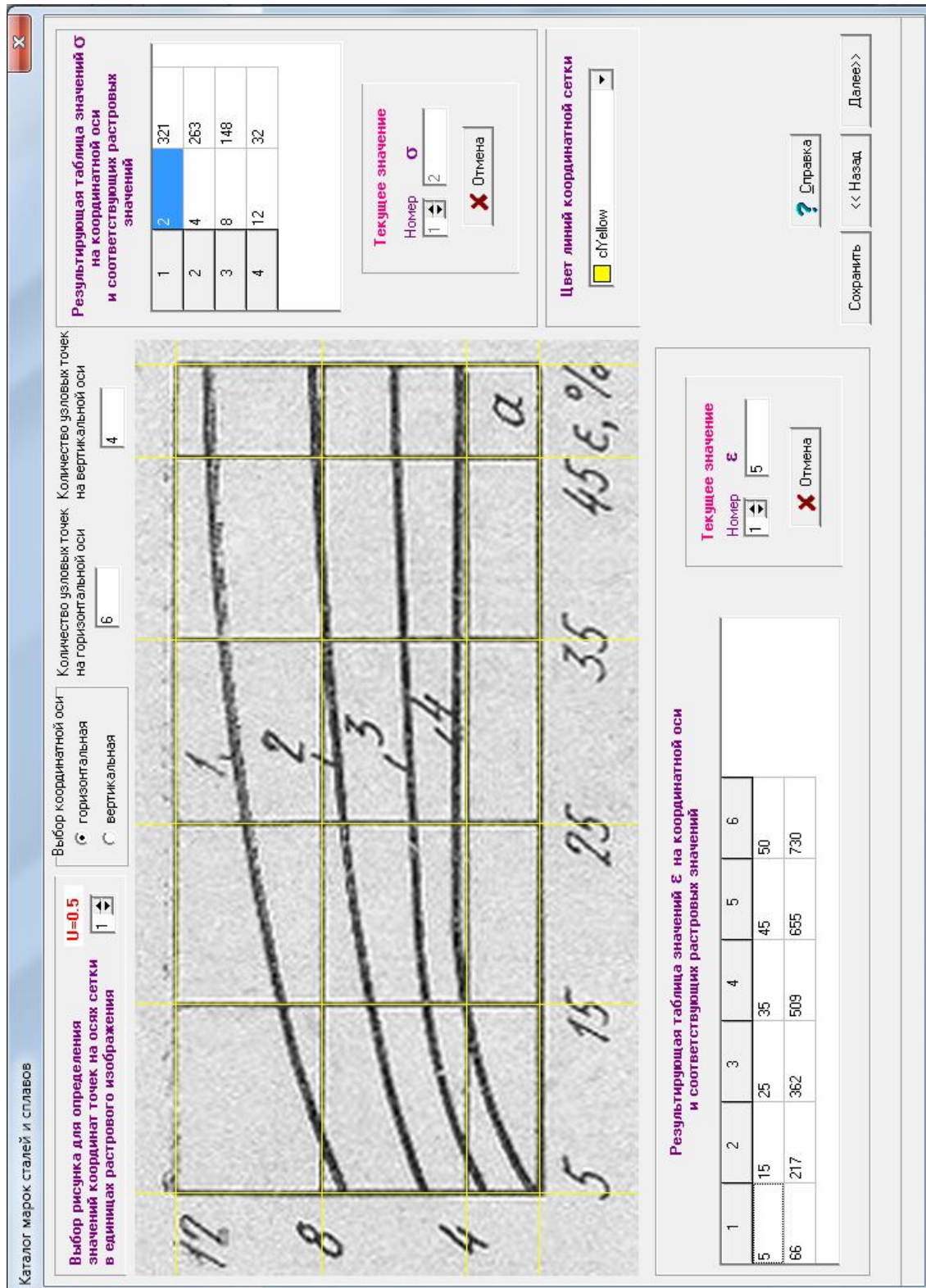


Рис. 2 - Окно построения координатной сетки

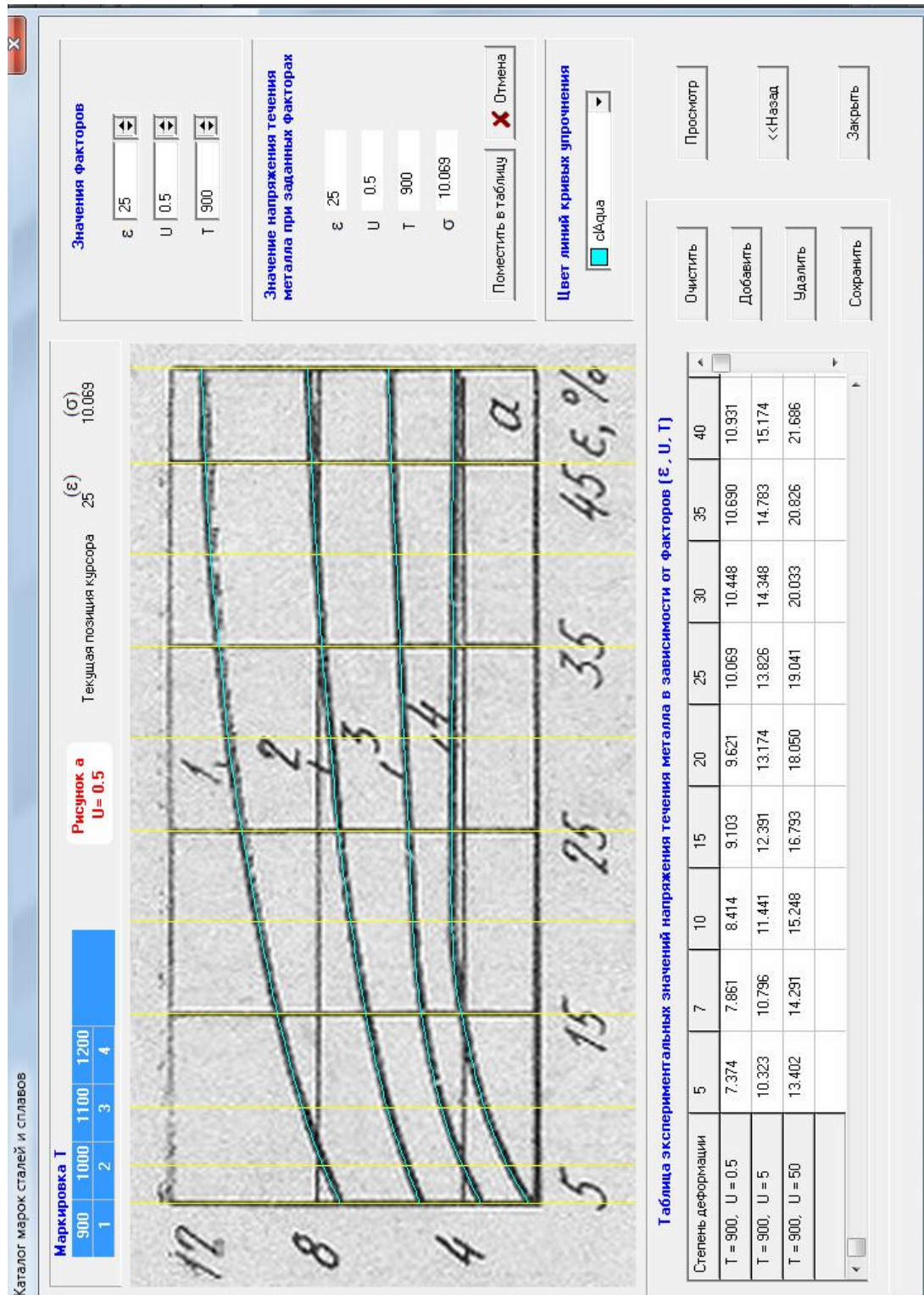


Рис. 3 - Окно снятия экспериментальной информации и контрольного построения сплайн – кривых

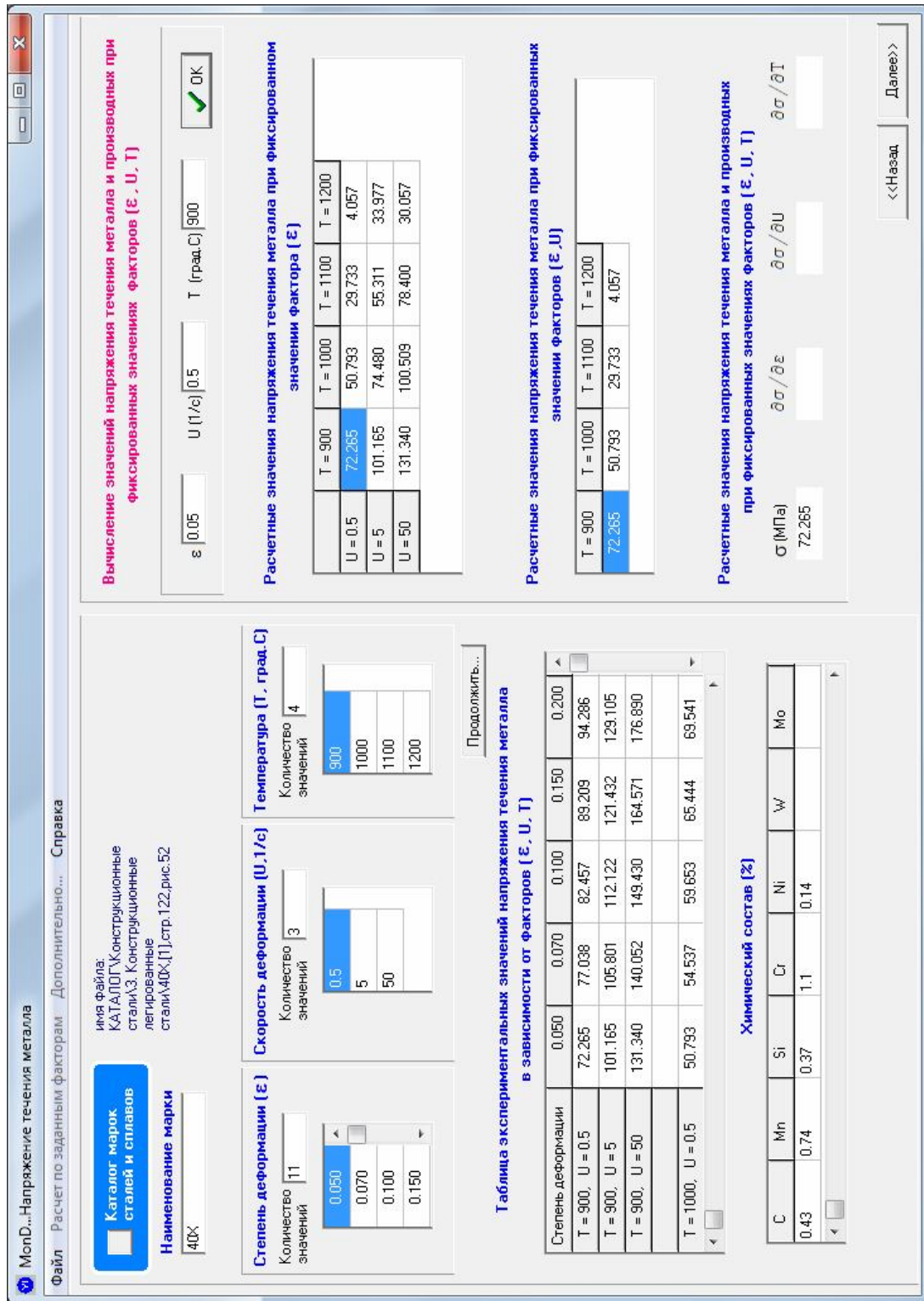


Рис. 4 - Окно расчета напряжения течения металла при фиксированных значениях скорости деформации, степени деформации и температуры на основе экспериментальной информации

вующих заданным значениям ε . Расширив, таким образом, таблицу 1 и уточнив, в случае необходимости, информацию по отдельным точкам, добиваются полного совпадения интерполяционной кривой с исходной.

Рассчитанные в окне (см. рис.3) величины σ при текущих значениях ε , U, T автоматически передаются в соответствующую таблицу окна на рис. 4. Метод расчета подробно изложен в работе [3].

Таблица 1

Значения величин σ (кгс/мм²) для стали 40X при заданных значениях факторов, полученные в ходе работы программы (информация передана из окна рис.3)

| T, °C | U, с ⁻¹ | ε , % | | | | | | | | | | |
|-------|--------------------|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | 5 | 7 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 |
| 900 | 0,5 | 7,374 | 7,861 | 8,414 | 9,103 | 9,621 | 10,069 | 10,448 | 10,690 | 10,931 | 11,069 | 11,172 |
| 900 | 5 | 10,323 | 10,796 | 11,441 | 12,391 | 13,174 | 13,826 | 14,348 | 14,783 | 15,174 | 15,391 | 15,565 |
| 900 | 50 | 13,402 | 14,291 | 15,248 | 16,793 | 18,050 | 19,041 | 20,033 | 20,826 | 21,686 | 22,281 | 23,074 |
| 1000 | 0,5 | 5,183 | 5,565 | 6,087 | 6,678 | 7,096 | 7,443 | 7,652 | 7,896 | 8,034 | 8,172 | 8,276 |
| 1000 | 5 | 7,600 | 8,086 | 8,731 | 9,548 | 10,237 | 10,839 | 11,226 | 11,613 | 11,828 | 12,043 | 12,130 |
| 1000 | 50 | 10,256 | 11,077 | 12,103 | 13,470 | 14,632 | 15,658 | 16,331 | 16,860 | 17,455 | 18,050 | 18,446 |
| 1100 | 0,5 | 3,034 | 4,000 | 4,591 | 5,148 | 5,391 | 5,496 | 5,635 | 5,739 | 5,843 | 5,983 | 6,052 |
| 1100 | 5 | 5,644 | 5,956 | 6,533 | 7,244 | 7,822 | 8,301 | 8,602 | 8,860 | 9,032 | 9,118 | 9,075 |
| 1100 | 50 | 8,000 | 8,547 | 9,368 | 10,462 | 11,214 | 11,897 | 12,308 | 12,855 | 13,197 | 13,538 | 13,812 |
| 1200 | 0,5 | 0,414 | 1,586 | 2,828 | 4,035 | 4,313 | 4,313 | 4,313 | 4,278 | 4,313 | 4,278 | 4,278 |
| 1200 | 5 | 3,467 | 4,044 | 4,578 | 5,244 | 5,778 | 6,133 | 6,444 | 6,622 | 6,622 | 6,711 | 6,622 |
| 1200 | 50 | 3,067 | 4,000 | 5,067 | 6,533 | 7,600 | 8,342 | 8,615 | 8,889 | 9,026 | 9,162 | 9,162 |

Разработка метода [3] и компьютерных программ, окна которых показаны на рис. 1 – 4, позволили наиболее точно получить значения σ из экспериментальных кривых упрочнения.

Эти значения (см. таблицу 1) далее будем использовать для оценки точности методов расчета напряжения течения металла.

Для выполнения анализа точности методов [1] и [2] потребовалась разработка дополнительных компьютерных программ. Во-первых, были запрограммированы методы Николаева В.А. [1] и Андреюка Л.В. и др [2]. Во-вторых, была разработана программа, которая в автоматизированном режиме формирует план-матрицу планируемого эксперимента для рассматриваемой марки стали. Так как величина σ зависит от трех факторов: ε , U, T, то применив центральное композиционное ортогональное планирование [4], получили план-матрицу в виде, показанном на рис. 5, 6. Эксперимент спланирован по плану 2-го порядка.

Из базы данных для рассматриваемой марки стали (см. рис. 1 – 4) в таблицу, расположенную в верхней части окна (см. рис. 5, 6), передаются пределы изменения факторов ε , U и T, имеющиеся в итоговой таблице 1. В этом же окне формируется таблица кодовых и натуральных значений факторов. В соответствии с теорией [4] план-матрица всегда содержит 15 строк для определения величин σ при указанных в них значениях факторов ε , U и T. Планируемый эксперимент, включающий 15 расчетов величин σ , охватывает всю область изменения факторов ε , U и T и определяет наиболее рациональные точки для сопоставления экспериментальных и расчетных значений σ .

На рис 5 и 6 для стали 40X показаны значения напряжения течения металла $\sigma_{\text{эксп}}$, полученные на основе кривых упрочнения, и σ_p , полученные в результате расчета по методам [1] и [2] при одних и тех же значениях факторов ε , U и T. Также найдена относительная погрешность для каждого из 15 расчетов и средняя относительная погрешность по всему планируемому эксперименту для указанной выше стали.

Расчеты, аналогичные тем, что представлены на рис. 5 и 6, выполнены для 27 марок сталей, включая конструкционные, инструментальные и нержавеющей (см. таблицу 2). Установлено, что средняя относительная погрешность метода Николаева В.А. [1] составила 14,5% (макс-

Метод Николаева В.А. Пределы изменения факторов

Группа стали - 1
 Углеродистые и инструментальные стали
 0.8кп; 08к; 20; Ст.3; 45; Ст.6; У8 и др.

Группа стали - 2
 Легированные и низколегированные стали

Укажите группу стали (1-7)

ε_{мин} 0.050 ε_{макс} 0.500 U_{мин} (1/c) 0.5 U_{макс} (1/c) 50 T_{мин} (град.С) 900 T_{макс} (град.С) 1200

| Кодовые значения факторов | ε | U (1/c) | T (град.С) |
|-------------------------------|---------|---------|------------|
| Кодовые значения факторов | -1.2154 | -1 | +1 |
| Натуральные значения факторов | 0.050 | 0.0899 | 0.2750 |
| | 0.5 | 4.886 | 25.250 |
| | 900 | 926.584 | 1173.416 |

Кодовые и натуральные значения факторов

| Кодовые значения факторов | ε | U (1/c) | T (град.С) | σ _{экл.} (МПа) |
|---------------------------|----|---------|------------|-------------------------|
| -1 | -1 | -1 | 926.584 | 102.734 |
| -1 | -1 | 0 | 926.584 | 142.057 |
| -1 | -1 | +1 | 926.584 | 134.831 |
| -1 | 0 | -1 | 926.584 | 202.503 |
| -1 | 0 | 0 | 926.584 | 48.196 |
| -1 | 0 | +1 | 926.584 | 71.701 |
| -1 | +1 | -1 | 926.584 | 57.394 |
| -1 | +1 | 0 | 926.584 | 98.675 |
| -1 | +1 | +1 | 926.584 | 78.908 |
| 0 | 0 | 0 | 926.584 | 131.455 |
| 0 | 0 | 0 | 926.584 | 63.387 |
| 0 | 0 | 0 | 926.584 | 137.918 |
| 0 | 0 | 0 | 926.584 | 166.198 |
| 0 | 0 | 0 | 926.584 | 73.612 |
| 0 | 0 | 0 | 926.584 | 117.736 |

План-матрица эксперимента

| X1 | X2 | X3 | ε | U (1/c) | T (град.С) | σ _{экл.} (МПа) |
|---------|---------|---------|--------|---------|------------|-------------------------|
| -1 | -1 | -1 | 0.0899 | 4.886 | 926.584 | 102.734 |
| +1 | -1 | -1 | 0.4601 | 4.886 | 926.584 | 142.057 |
| -1 | +1 | -1 | 0.0899 | 45.614 | 926.584 | 134.831 |
| +1 | +1 | -1 | 0.4601 | 45.614 | 926.584 | 202.503 |
| -1 | -1 | +1 | 0.0899 | 4.886 | 1173.416 | 48.196 |
| +1 | -1 | +1 | 0.4601 | 4.886 | 1173.416 | 71.701 |
| -1 | +1 | +1 | 0.0899 | 45.614 | 1173.416 | 57.394 |
| +1 | +1 | +1 | 0.4601 | 45.614 | 1173.416 | 98.675 |
| -1.2154 | 0 | 0 | 0.050 | 25.250 | 1050.000 | 78.908 |
| +1.2154 | 0 | 0 | 0.500 | 25.250 | 1050.000 | 131.455 |
| 0 | -1.2154 | 0 | 0.2750 | 0.5 | 1050.000 | 63.387 |
| 0 | +1.2154 | 0 | 0.2750 | 50 | 1050.000 | 137.918 |
| 0 | 0 | -1.2154 | 0.2750 | 25.250 | 900 | 166.198 |
| 0 | 0 | +1.2154 | 0.2750 | 25.250 | 1200 | 73.612 |
| 0 | 0 | 0 | 0.2750 | 25.250 | 1050.000 | 117.736 |

Результаты расчета

| К _Г | К _ε | К _U | К _T | Δ (%) | σ _р (МПа) |
|----------------|----------------|----------------|----------------|--------|----------------------|
| 1 | 0.996 | 0.996 | 1.168 | 4.170 | 107.018 |
| 2 | 1.426 | 1.426 | 1.168 | 7.795 | 153.130 |
| 3 | 0.996 | 0.996 | 1.168 | 3.005 | 138.882 |
| 4 | 1.426 | 1.426 | 1.168 | 1.866 | 198.725 |
| 5 | 0.996 | 0.996 | 0.612 | 16.250 | 56.028 |
| 6 | 1.426 | 1.426 | 0.612 | 11.811 | 80.169 |
| 7 | 0.996 | 0.996 | 0.612 | 26.686 | 72.710 |
| 8 | 1.426 | 1.426 | 0.612 | 5.437 | 104.040 |
| 9 | 0.911 | 0.911 | 0.868 | 9.986 | 86.787 |
| 10 | 1.430 | 1.430 | 0.868 | 3.633 | 136.230 |
| | | | | 37.106 | 86.907 |
| | | | | 1.511 | 135.834 |
| | | | | 6.091 | 176.321 |
| | | | | 7.887 | 79.425 |
| | | | | 4.611 | 123.165 |

σ = σ₀ · K_Г · K_ε · K_U
 σ₀ = 80 + 25 · (1 - [5 - M₁^{1.8} / 4.5])

Δσр (%) 9.857 M₁ 2.780 σ₀ 97.992

Справка

M₁ и M₂ - суммы химических элементов в данной стали, % (кроме серы и фосфора);
 для M₁ < 5 или M₁ = 5 σ₀ = 80 + 25 · (1 - [5 - M₁^{1.8} / 4.5]);
 для M₂ > 5 σ₀ = 110 + 38 · (M₂ - 2)^{0.25} · M₂
 Предельно допустимое значение M₂ = 32.
 K_Г = 1.66 - 1.1 · (T / 400)^{0.7}

| Группа стали | ε | Вид выражения |
|--------------|-------------|---|
| 1, 2 | 0.025...0.1 | K _ε = 0.8 + 0.2 · [1 - 178 · (0.1 - ε) ²] |
| 1, 2 | > 0.1 | K _ε = 1 + 0.43 · [1 - 6.3 · (0.5 - ε) ²] |
| 4 | 0.025...0.1 | K _ε = 0.7 + 0.3 · [1 - 30 · (0.1 - ε) ^{1.5}] |
| 4 | > 0.1 | K _ε = 1 + 0.68 · [1 - 6.3 · (0.5 - ε) ²] |
| 3, 6, 7 | 0.025...0.1 | K _ε = 0.7 + 0.3 · [1 - 50 · (0.1 - ε) ^{1.5}] |
| 3, 6, 7 | > 0.1 | K _ε = 1 + 0.38 · [1 - 6.3 · (0.5 - ε) ²] |
| 5 | 0.025...0.1 | K _ε = 0.7 + 0.3 · [1 - 30 · (0.1 - ε) ^{1.5}] |
| 5 | > 0.1 | K _ε = 1 + 0.5 · [1 - 9 · (0.5 - ε) ²] |

| Группа стали | U, (1/c) | Вид выражения |
|--------------|-------------|---|
| 1, 2 | 0.001...0.4 | K _U = 0.22 + 0.072 · (U + ln U) |
| 1, 2 | 0.4...10 | K _U = 0.38 + 0.065 · (U + ln U) |
| 3-7 | 0.001...10 | K _U = 0.85 + 0.067 · ln U |
| 1, 2 | > 10 | K _U = 1.03 + 0.1 · (ln U - 2.3) ^{1.5} |
| 3-5, 7 | > 10 | K _U = 1.03 + 0.11 · (ln U - 2.3) ^{1.05} |
| 6 | > 10 | K _U = 1.03 + 0.13 · (ln U - 2.3) ^{2.2} |

а

б

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., Толенева Г.Г., Прицера В.С.

Пределы изменения факторов

| | | | | | |
|-------|-------|-------------|-------------|-----------------|-----------------|
| ε min | ε max | U min (1/c) | U max (1/c) | T min, (град.С) | T max, (град.С) |
| 0.050 | 0.500 | 0.5 | 900 | 900 | 1200 |

Кодовые и натуральные значения факторов

| | | | |
|-------------------------------|--------|----------|------------|
| Кодовые значения факторов | ε | U (1/c) | T (град.С) |
| -1, 2, 154 | 0.050 | 0.5 | 900 |
| Натуральные значения факторов | ε | U (1/c) | T (град.С) |
| 0.0899 | 4.886 | 926.584 | 1050.000 |
| 0.4601 | 4.886 | 926.584 | 1050.000 |
| 0.0899 | 45.614 | 926.584 | 1050.000 |
| 0.4601 | 45.614 | 926.584 | 1050.000 |
| 0.0899 | 4.886 | 1173.416 | 48.196 |
| 0.4601 | 4.886 | 1173.416 | 71.701 |
| 0.0899 | 45.614 | 1173.416 | 57.394 |
| 0.4601 | 45.614 | 1173.416 | 98.675 |
| 0.050 | 25.250 | 1050.000 | 78.908 |
| 0.500 | 25.250 | 1050.000 | 131.495 |
| 0.2750 | 0.5 | 1050.000 | 63.387 |
| 0.2750 | 50 | 1050.000 | 137.918 |
| 0.2750 | 25.250 | 900 | 166.198 |
| 0.2750 | 25.250 | 1200 | 73.612 |
| 0.2750 | 25.250 | 1050.000 | 117.736 |

План-матрица эксперимента

| | X1 | X2 | X3 | ε | U (1/c) | T (град.С) | σ _р (МПа) | σ _{эксп.} (МПа) |
|----|---------|---------|---------|--------|---------|------------|----------------------|--------------------------|
| 1 | -1 | -1 | -1 | 0.0899 | 4.886 | 926.584 | 125.337 | 102.734 |
| 2 | +1 | -1 | -1 | 0.4601 | 4.886 | 926.584 | 175.994 | 142.057 |
| 3 | -1 | +1 | -1 | 0.0899 | 45.614 | 926.584 | 169.723 | 134.831 |
| 4 | +1 | +1 | -1 | 0.4601 | 45.614 | 926.584 | 238.319 | 202.503 |
| 5 | -1 | -1 | +1 | 0.0899 | 4.886 | 1173.416 | 59.921 | 48.196 |
| 6 | +1 | -1 | +1 | 0.4601 | 4.886 | 1173.416 | 84.139 | 71.701 |
| 7 | -1 | +1 | +1 | 0.0899 | 45.614 | 1173.416 | 81.141 | 57.394 |
| 8 | +1 | +1 | +1 | 0.4601 | 45.614 | 1173.416 | 113.936 | 98.675 |
| 9 | -1.2154 | 0 | 0 | 0.050 | 25.250 | 1050.000 | 93.804 | 78.908 |
| 10 | +1.2154 | 0 | 0 | 0.500 | 25.250 | 1050.000 | 151.399 | 131.495 |
| 11 | 0 | -1.2154 | 0 | 0.2750 | 0.5 | 1050.000 | 78.521 | 63.387 |
| 12 | 0 | +1.2154 | 0 | 0.2750 | 50 | 1050.000 | 146.694 | 137.918 |
| 13 | 0 | 0 | -1.2154 | 0.2750 | 25.250 | 900 | 216.440 | 166.198 |
| 14 | 0 | 0 | +1.2154 | 0.2750 | 25.250 | 1200 | 88.091 | 73.612 |
| 15 | 0 | 0 | 0 | 0.2750 | 25.250 | 1050.000 | 133.704 | 117.736 |

Результаты расчета

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

| | |
|---|--------|
| N | 88.577 |
| A | 0.136 |
| B | 0.208 |
| C | -3.125 |

Δ ср (%) 21.048
 2/3 степени деформ.

Исходная информация

Наименование марки: 40X

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

Приложение:
 Составление элемента С может измениться в пределах 0.04 - 1.2%; содержание остальных элементов может достигать:
 14% Mn, 4% Si, 24% Cr, 76% Ni, 17% W, 1% V, 3% Ti, 5% Al, 15% Co, 1% Nb, 2% Cu.

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

симальная относительная погрешность (для стали P18, 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 P18, см. таблицу 2) равна 67%). Указанные результаты

Таблица 2
 Средняя относительная погрешность при расчете величины σ по методам [1] и [2]

| Обозначение марки стали, номер страницы, номер рисунка в работе [5] | Назначение стали | Пределы измерения факторов | | Δср, % | |
|---|--|----------------------------|--------------------|--------|-------|
| | | ε | U, с ⁻¹ | [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 |
| P18, стр.168, рис.128 | инструментальная быстрорежущая | 0,05-0,5 | 0,05-7,5 | 32,32 | 29,89 |
| P18, 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 |
| 12Х18Н9Т, стр.211, рис.181 | нержавеющая | 0,05-0,5 | 0,05-150 | 30,01 | 11,56 |
| 40Х13, стр.190, рис.149 | нержавеющая | 0,05-0,4 | 0,5-50 | 11,54 | 44,75 |
| 40Х13, стр.191, рис.150 | нержавеющая | 0,05-0,4 | 0,05-150 | 29,53 | 9,39 |

Пределы изменения температуры по всем маркам сталей- (900 - 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_0 , МПа | Метод [2] | | | |
|---|----------------------------|--------------------|-------------------------------|-----------|-------|-------|--------|
| | ϵ | U, с ⁻¹ | | 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. (Rus.)
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. (Rus.)
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. (Rus.)
4. Vinarskiy M.S. Planning of experiment in technological researches: studies. manual / M.S. Vinarskiy, M.V Lur'e. – K.: of Technician, 1975. – 168p. (Rus.)
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. (Rus.)
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. (Rus.)

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

Статья поступила 30.11.2011

УДК 621.7-97: 621.771.016: 621.771.23

©Сердюк И.А.¹, Хаджинов А.С.², Дворников С.Г.³, Холодный А.А.⁴, Присяжный А.Г.⁵

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРЫ РАСКАТА В
ПРОЦЕССЕ ГОРЯЧЕЙ ЛИСТОВОЙ ПРОКАТКИ МЕТОДОМ
КРИТЕРИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ**

В статье на основе классических уравнений, описывающих процессы теплообмена, предложена математическая модель расчета среднemasсовой температуры металла при горячей листовой прокатке, учитывающая все основные статьи теплового баланса и в достаточной степени соответствующая экспериментальным данным.

Ключевые слова: тепловой поток, температура раската, излучение, конвекция, пленочное кипение, работа деформации.

¹ канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

² канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

³ студент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

⁴ студент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

⁵ старший преподаватель, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь