

## ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ КРИВЫХ ТЕКУЧЕСТИ НА ПРИМЕРЕ РЯДА УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

С.В. Карпов

*Показана необходимость предварительной обработки экспериментальных кривых упрочнения при использовании их в инженерных расчетах технологических процессов обработки металлов давлением. Описана методика предварительной обработки кривых с помощью разработанного программного обеспечения в виде двух программ. Язык программирования Delphi.*

*Ключевые слова: кривые текучести, сталь 45, удлинение кривых, аппроксимация, экстраполяция, кинематические зависимости, температурные зависимости.*

Кривые текучести сталей и сплавов являются основой для определения значений сопротивлений деформаций, обозначаемых обычно  $\sigma_s$  и используемых для расчета энергосиловых параметров оборудования предназначенного для выполнения операций прессования,ковки, листовой штамповки как в холодном, так и горячем состоянии. По кривым упрочнения накоплен значительный объем экспериментальных исследований [1]. Простейшей зависимостью отражающей связь между напряжением  $\sigma_s$  степенью деформации  $\varepsilon$ , скоростью деформации  $\xi$  и температурной деформации  $\theta$ , является зависимость вида [1, 2]

$$\sigma_s = b\varepsilon^\alpha \xi^\beta \exp\left(\frac{\theta}{\theta_0}\right) \quad (1)$$

Логарифмированием функция (1) превращается в полином

$$S = X_0 + \alpha X_1 + \beta X_2 + \gamma X_3,$$

$$X_0 = \ln b, \quad X_1 = \ln \varepsilon, \quad X_2 = \ln \xi, \quad X_3 = \theta/1000^\circ \text{C}.$$

Коэффициенты  $X_i$  которого могут быть определены на основе матрицы дробного факторного эксперимента. Данные для матрицы при этом могут быть определены замерами значений сопротивлений деформаций при фиксированных значениях

$$\varepsilon_{\max}, \quad \varepsilon_{\min}, \quad \xi_{\max}, \quad \xi_{\min}, \quad \theta_{\max}, \quad \theta_{\min}.$$

Однако использование экспериментальных данных затруднено зачастую ограниченной нерегулярной областью определения исходных кривых, как по степени деформации, так по скорости и температуре деформации. Кроме того, экспериментальные кривые могут быть представлены в системах координат, определяемых относительными или абсолютными значениями степени деформации. Таким образом, построение даже простейшей

формулы, описывающей зависимость сопротивления деформации, требует предварительной обработки экспериментальных данных. Далее рассмотрим предварительную обработку кривых упрочнения стали 45 [1], представленных на рисунках 1-3.

Разнообразие систем отчета, уровней факторов по степеням и скоростям деформации затрудняет сравнение кривых. Не дает возможности ответить на вопрос, как влияет химический состав, в частности, разное количество углерода на сопротивление деформации. Вторым вопросом насколько сравнимы представленные экспериментальные данные, несмотря на то, что они характеризуют одну и ту же марку стали.

Удлинение кривых с одновременным преобразованием системы координат, а также сохранение кривых в численном виде выполняется с помощью программы KSV433 [3]. При этом удлинение кривых осуществляется одной из трех подходящих функции.

$$\sigma_s = A\varepsilon^\alpha \exp\left(\frac{\beta\varepsilon}{\gamma}\right) \quad (2)$$

$$\sigma_s = A - B \exp\left(\frac{\varepsilon}{\gamma}\right) - C \exp\left(\frac{D\varepsilon}{\gamma}\right) \quad (3)$$

$$\sigma_s = A\varepsilon^\alpha \exp\left(\frac{\beta\varepsilon}{\gamma}\right) - B\varepsilon^\gamma \exp\left(\frac{\delta\varepsilon}{\gamma}\right) \quad (4)$$

Функция становится подходящей, если сумма квадратов отклонений, ее значений в базовых точках экспериментальной кривой меньше сумм квадратов отклонений для двух других функции. Как показывают результаты численных экспериментов функция (4) наиболее точно по сумме квадратов отклонений описывает кривые текучести, характерные для высоких и низких температур, больших и малых скоростей деформации, функция Смирнова – Аляева (2) только в 10% случаев описывает кривые более точно.

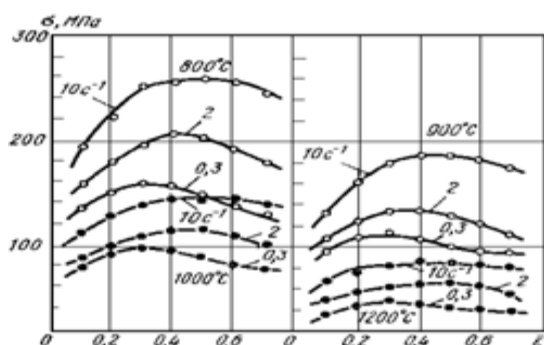


Рисунок 1. Кривые испытаний на сжатие стали 45 (0,43% С; 0,26% Si; 0,74% Mn; 0,022% P; 0,016% S) [1]

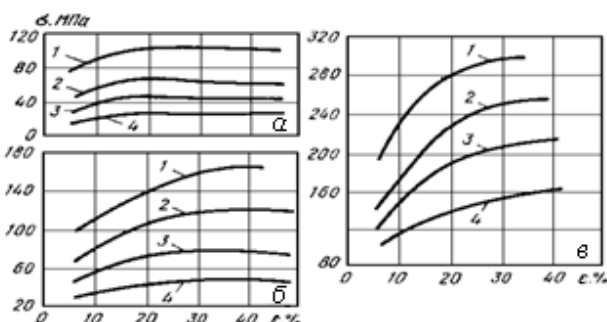


Рисунок 2. Кривые деформационного упрочнения стали 45 (0,44% С; 0,63% Mn; 0,29% Si; 0,022% P; 0,031% S; 0,09% Cr; 0,13% Ni; 0,20% Cu) при скорости деформации 0,05 (а), 7,5 (б) и 150 с-1 (в). Температура, С: 1 – 900; 2 – 1000; 3 – 1100; 4 – 1200.

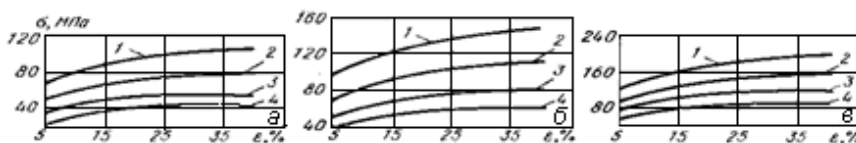


Рисунок 3. Кривые деформационного упрочнения образцов стали 45 (0,48% С; 0,53% Mn; 0,22% Si; 0,028% S; 0,025% P; 0,07% Cr; 0,11% Ni) при скорости деформации 0,5 (а), 5 (б) и 50 с-1 (в). Температура, °С: 1 – 900; 2 – 1000; 3 – 1100; 4 – 1200.

Функция (5) аналогична известной температурной зависимости [1]

$$\sigma_s = \sigma_{nl} \exp \left[ \frac{\theta_{nl} - \theta}{\theta_{nl}} \right],$$

где  $\sigma_{nl}$  - экстраполированный предел текучести стали соответствующий температуре плавления  $\theta_{nl}$ , но не требует знания предела текучести и температуры плавления. Обработкой данных рисунка 1 построены кривые, соответствующие температуре 1100 °С (рисунок 6). Обработкой данных рисунков 2 и 3 получены кривые, соответствующие температуре 800 °С (рисунки 7 и 8). В процессе по-

Результаты предварительной обработки кривых упрочнения стали 45 путем удлинения и переходу к логарифмической степени деформации показаны на рисунках 4 и 5. Расширение области определения кривых текучести по температуре и скоростям деформации может быть выполнено с помощью программы KSV433 [4]. Программа обрабатывает ранее созданные файлы трех видов:

а) *i*-файлы, когда каждой температуре деформации поставлено в соответствие несколько скоростей деформации с соответствующими значениями сопротивлений деформаций и степеней деформации;

б) *j*-файлы, когда для каждой скорости деформации поставлено в соответствие несколько температур деформации с соответствующими значениями степеней и сопротивлений деформаций;

в) *t*-файлы, содержащие предварительно обработанные данные. Расширение области определения кривых выполняем с помощью зависимости сопротивления деформации от относительной температуры деформации

$$\sigma_s = \sigma_0 \exp \left[ \frac{\theta}{\theta_0} \right], \quad (5)$$

где  $\sigma_0$ ,  $\theta_0$  – эмпирические коэффициенты, рассчитываемые аппроксимацией с использованием базовых точек температурных кривых.

строения дополнительных расчетных кривых выполнен визуальный отбор аппроксимирующих функций (4) уравнение прямой линии, квадратичной и кубической параболы. Можно отметить, что в данном случае экспоненциальная зависимость наиболее подходящая, поскольку расстояния от экспериментальных точек до кривой минимально.

Представление о характере аппроксимации точек температурной кривой экспоненциальной функцией (4) дает рисунок 9. На форме на левом экране нанесены известные точки температурной кривой, а на оси темпе-

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ КРИВЫХ ТЕКУЧЕСТИ НА ПРИМЕРЕ РЯДА УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

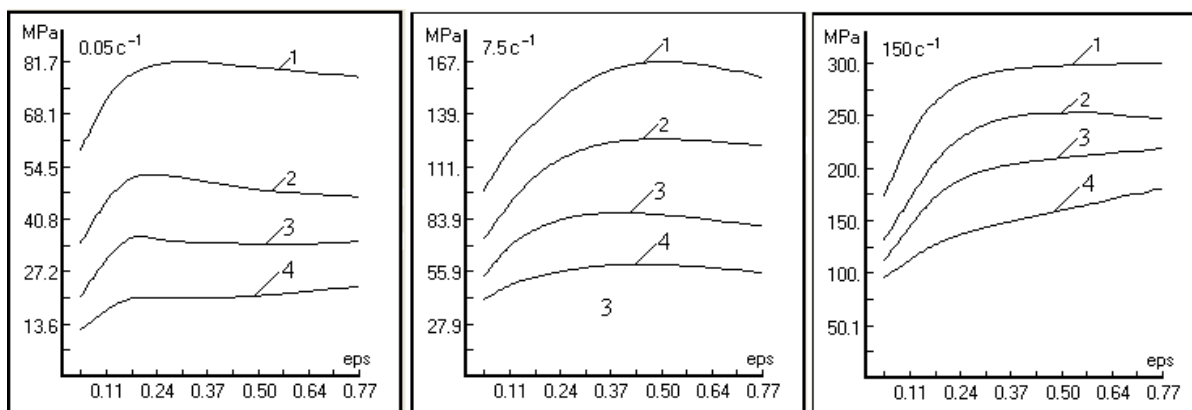


Рисунок 4. Преобразованные кривые упрочнения стали 45. Исходные кривые рис. 2  
Температура, °C: 900 - 1, 1000 - 2, 1100 - 3, 1200 - 4.

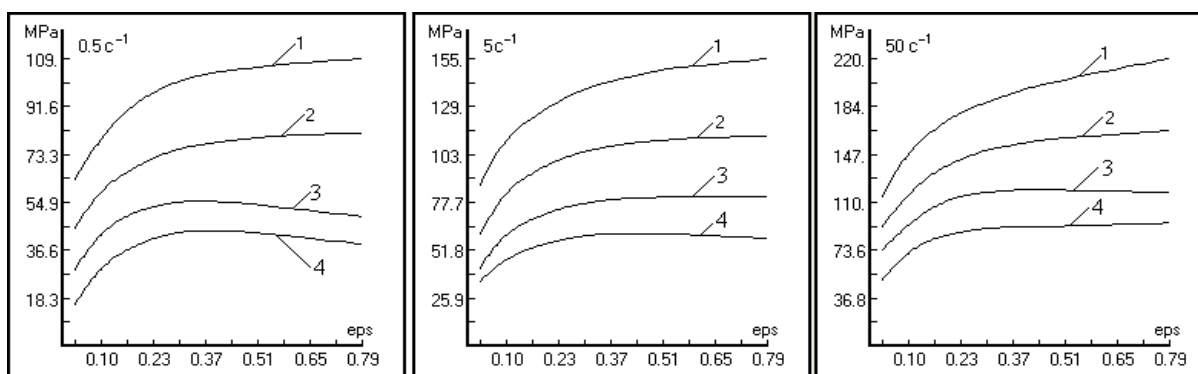


Рисунок 5. Преобразованные кривые упрочнения стали 45. Исходные кривые рис. 3  
Температура, °C: 900 - 1, 1000 - 2, 1100 - 3, 1200 - 4.

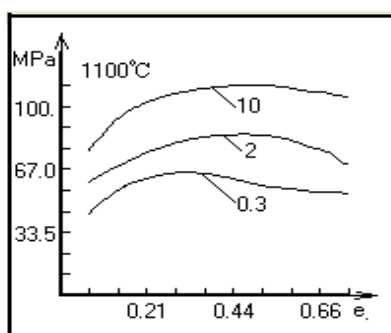


Рисунок 6. Кривые упрочнения стали 45 при температуре 1100°C, рассчитанные по кривым рисунка 1.

ратур нанесена точка, соответствующая дополнительной температуре. По четырем точкам, исходя из условий минимальных значений отклонений, осуществлен выбор экспоненциальной кривой (5). На правом экране на кривой восстановлена точка сопротивления деформации, соответствующая температуре 1100°C, степени деформации  $\varepsilon = 0,070$  и скорости деформации  $\xi = 0,3c^{-1}$ . Чтобы по-

строить полную кривую, соответствующую скорости  $\xi = 0,3c^{-1}$ , необходимо еще 9 раз обратиться к комбинированному списку (exрТ) для выбора аппроксимирующей функции. Окончание выбора подтвердить включением соответствующего переключателя, например, как на рисунке «Выбор окончен exрТ».

Количество восстановленных точек отображается на метке под комбинированным списком. Над чертой наносится число построенных точек сопротивления деформации под чертой – число базовых точек, которые необходимо восстановить для последующего построения кривой текучести. Расширение области определения кривых упрочнения по скорости осуществляется в программе с помощью кинематических кривых упрочнения, описываемых функциями вида

$$\sigma_s = \sigma_0 \left( \frac{\xi}{\xi_0} \right)^n, \quad (6)$$

где  $\sigma_0$ ,  $\xi_0$  - сопротивление деформации и скорость деформации в статистических условиях.

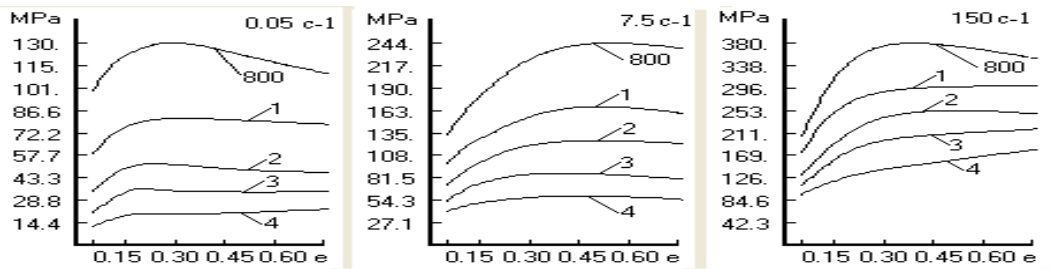


Рисунок 7. Кривые текучести стали 45 (0.44%С) по рис.2, 4 дополненные расчетными кривыми, соответствующими температуре 800 С.

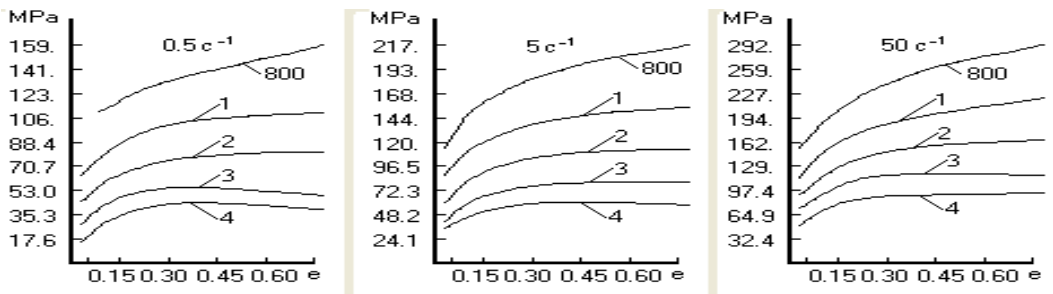


Рисунок 8. Кривые упрочнения стали 45 (исх. рис.3), дополненные кривой, соответствующей температуре 800 С

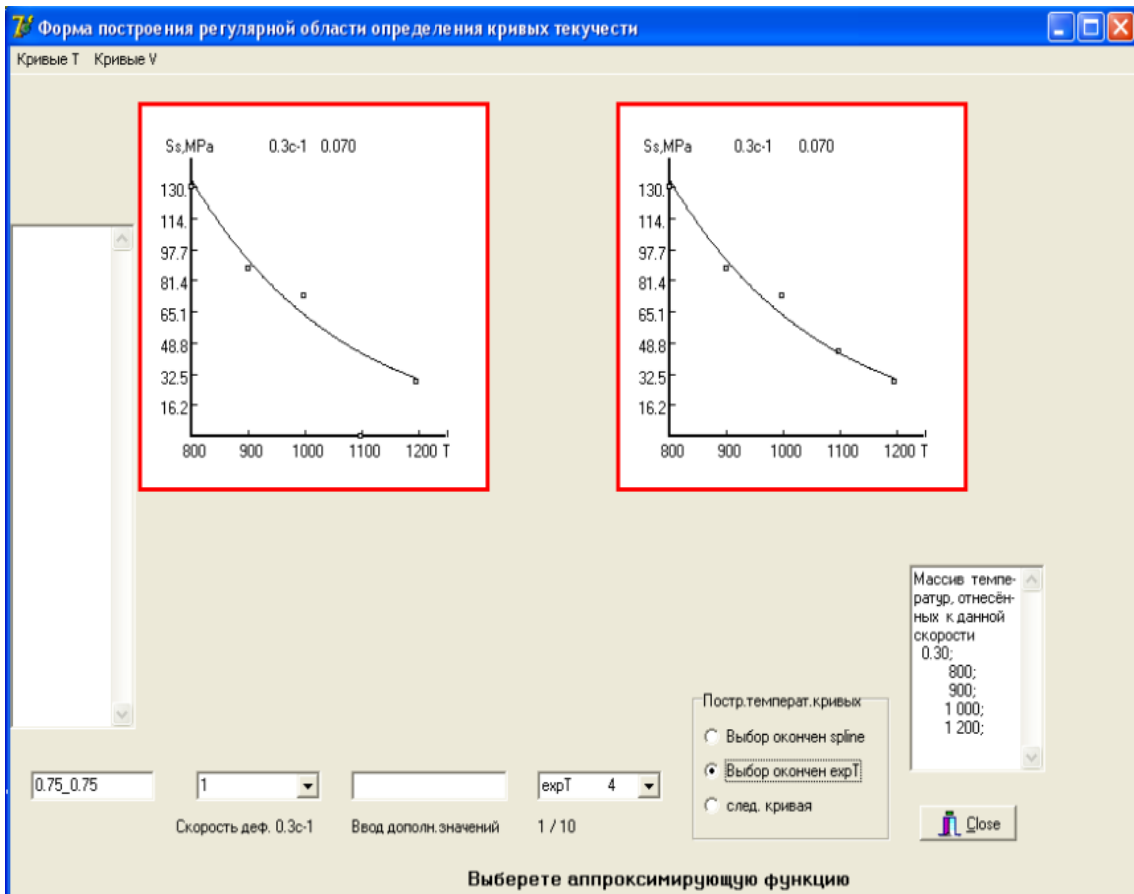


Рисунок 9 – Форма программы при окончании выполнения выбора функции, аппроксимирующей точки температурной кривой при степени деформации 0,070 и скорости деформации  $0,30 \text{ с}^{-1}$

## ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ КРИВЫХ ТЕКУЧЕСТИ НА ПРИМЕРЕ РЯДА УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

Эта же зависимость сопротивления деформации от скорости деформации может быть описана аналогичными функциями с двумя коэффициентами, а именно  $\sigma_s = A \dot{\epsilon}^n$ . Значения коэффициентов  $A$  и  $n$  в программе получены методом наименьших квадратов.

Результаты обработки экспериментальных кривых текучести (рисунки 1-3) представ-

лены на рисунках 10-12. Разработанное программное обеспечение обработки экспериментальных кривых текучести, позволяет автоматизировать процесс обработки, нивелировать особенности визуального представления кривых и получить данные о свойствах исследуемой марки стали как внутри, так и вне области эксперимента.

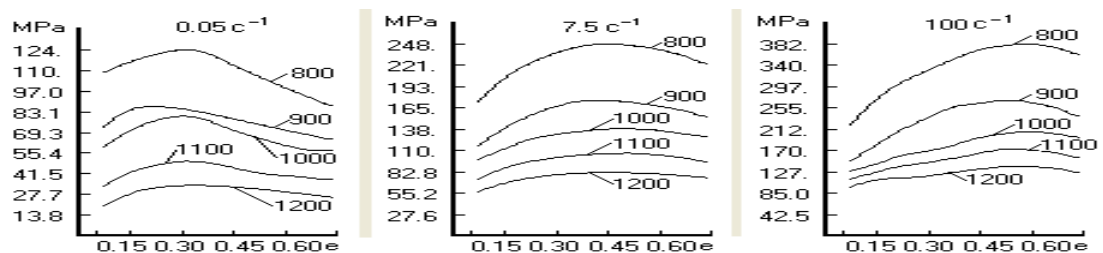


Рисунок 10. Восстановленные (расчетные) кривые упрочнения стали 45 (0,43%С).

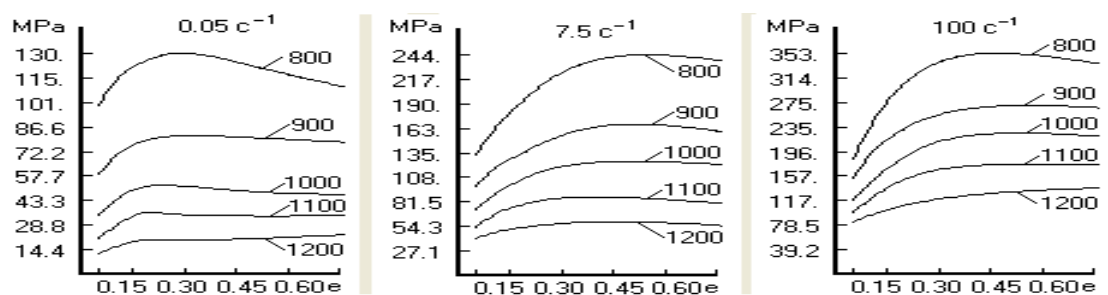


Рисунок 11. Экспериментальные и расчетные при  $\dot{\epsilon}=100\text{c}^{-1}$  кривые упрочнения стали 45 (0,44%С).

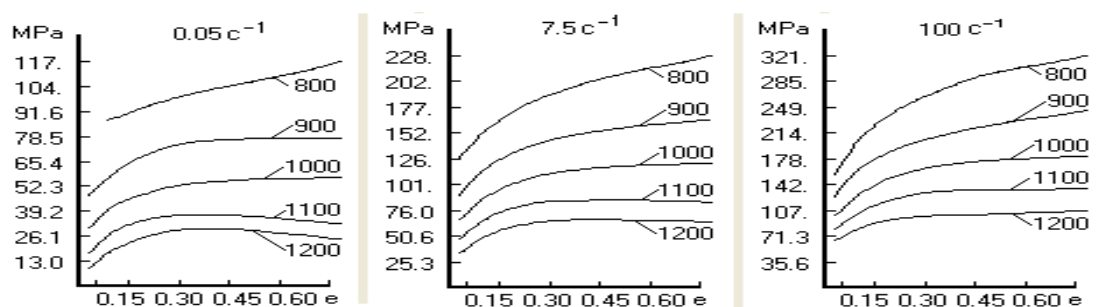


Рисунок 12. Восстановленные кривые упрочнения стали 45 (0,48%С)

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полухин П.И. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов. Справочник / П.И. Полухин, Г.Я. Гунн, А.М. Галкин. – М.: Металлургия, 1983. – С.352.
2. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением. Справочник / А.В. Третьяков, В.И. Зюзин. 2-е изд. М.: Металлургия, 1973. – С. 224.
3. Выравнивание области определения экспериментальных кривых упрочнения на основе

аппроксимации и экстраполяции / Свидетельство о гос. рег. программы для ЭВМ № 2009616028.

4. Расширение области определения кривых текучести по температурам и скоростям деформации с выбором аппроксимирующих и экстраполирующих зависимостей / Свидетельство о гос. рег. программы для ЭВМ №2009617035.

**Карпов С.В.**, к.т.н., доц.,  
АлтГТУ им. И.И. Ползунова, Барнаул,  
тел. (3852)367882, e-mail: [MtiokSV@jandex.ru](mailto:MtiokSV@jandex.ru)