

ПОСТРОЕНИЕ РЕГУЛЯРНЫХ МАССИВОВ КРИВЫХ ТЕКУЧЕСТИ МАЛОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ И ИХ АНАЛИТИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ

С.В. Карпов

Проведено построение регулярных областей определения кривых упрочнения 5 марок малоуглеродистых сталей на основе интерполяции и аппроксимации известных экспериментальных данных. Показана возможность расширения области определения кривых по температурам и скоростям деформации. Приведена формула описания отдельных кривых упрочнения. Установлено, что семейства кривых упрочнения исследованных марок сталей, адекватно описываются полиномиальной зависимостью 5 – й степени. Обработка кривых упрочнения выполнена с помощью разработанного программного обеспечения на языке Delphi.

Ключевые слова. Кривые упрочнения. Малоуглеродистые стали. Область определения. Программное обеспечение.

Определение энергосиловых параметров кузнечно- прессового оборудования, расчет и моделирование операций пластической деформации во многом зависят от знания реологических свойств сталей и сплавов, проявляющихся при горячей деформации. Прочностные свойства материалов, обрабатываемых пластическим деформированием, отражаются в кривых упрочнения, графически изображающих зависимость сопротивления деформации σ_s от (логарифмической) степени деформации при фиксированных значениях скорости ξ и температуры θ °С. Наиболее полно результаты экспериментального построения кривых упрочнения представлены в справочнике [1].

На кафедре МТиО АлтГТУ разработан комплекс программ, обеспечивающих преобразование графического представления кривых в численное представление. А на этой основе позволяющих выполнять преобразование и расширение области определения кривых упрочнения, построение расчетных кривых упрочнения для значений температур и скоростей, отличных от экспериментальных, расчет сопротивлений деформации для любой точки области определения кривых, а также построение функциональных зависимостей, как для отдельной кривой, так и для семейств кривых.

В настоящей статье представлен результат обработки кривых упрочнения малоуглеродистых сталей химический состав, которых представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Химический Состав и условия испытаний углеродистых сталей [1]

Марка стали или условное обозначение	Химический состав, %	Температура испытаний, °С				
		800	900	1000	1100	1200
		Скорости деформации, С ⁻¹				
1	2	3	4	5	6	7
(01)	0.01C, 0.19Mn, 0.15Si	0.5	0.5	0.5	–	–
		2.0	2.0	2.0	–	2.0
		20.0	20.0	20.0	–	20.0
		140.0	140.0	140.0	140.0	–
(03)	0.03C, 0.62Mn, 0.32Si	0.5	0.5	0.5	–	–
		2.0	2.0	2.0	–	2.0
		3	4	5	6	7
		20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
		140.0	140.0	140.0	140.0	140.0
08	0.087C, 0.003Si, 0.34Mn, 0.025P, 0.02S	0.3	0.3	0.3	–	0.3
		2.0	2.0	2.0	–	2.0
		10.0	10.0	10.0	–	10.0

Продолжение таблицы 1

12	0.12C, 0.20Si, 0.50Mn, 0.01P, 0.03S, 0.08Cr,	0.8	–	0.8	–	0.8
		–	3.5	3.5	3.5	–
		10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
		–	30.0	30.0	30.0	–
		100.0	–	100.0	–	100.0
(15C)	0,27Si, 0,48Mn, 0,014P, 0.03S, 0.27Cu, 0.1Ni, 0.7Cr	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
		2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
		10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
15	0,12Si, 0,68Mn, 0,034S, 0.025P	–	1.5	1.5	1.5	1.5
		–	8.0	8.0	8.0	8.0
		–	40.0	40.0	40.0	40.0
		–	100.0	100.0	100.0	100.0
		–	–	–	–	–

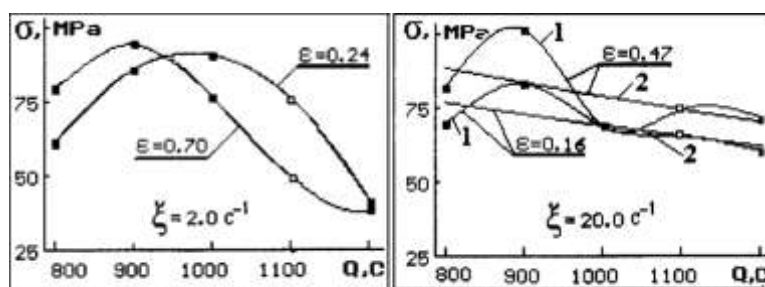


Рисунок 1. К схеме восстановления кривых текучести при температуре 1100 °С
■ - экспериментальные точки, □ - расчетные точки.

Кривые упрочнения, перечисленные в таблице 1, были получены при температурах: 800, 900, 1000, 1100, 1200 °С или при каком-либо наборе температур из приведенного ряда. Набор скоростей испытаний представлен значениями $\xi = 0,3, 0,5, 0,8, 1,5, 2, 3,5, 10, 20, 40, 100, 140 \text{ c}^{-1}$. С помощью программы POVOD [2] экспериментальные кривые упрочнения записаны в виде текстовых файлов: t01. txt, t03. txt, t09. txt, t12. txt, t15C. txt, t15. txt.

Образование регулярной области определения кривых текучести для стали условно обозначенной (01), удобно начинать с расчета значений σ_s при значениях температуры $\theta = 1100$ и 1200°C и соответствующих скоростях деформации $\xi = 2.0, 20.0, 140.0 \text{ c}^{-1}$ с помощью температурных кривых вида

$$\sigma_s = b_0 \exp[b_1(1 - \theta^*)] \quad (1)$$

где b_0, b_1 – эмпирические коэффициенты, $\theta^* = \theta/1000^\circ$ – относительная температура. Каждой скорости деформации соответствует свой вид температурной кривой. Кривые строятся путем интерполяции экспериментальных точек подходящей зависимостью (см. рис. 1, 2, 3). Относительно рассматриваемой стали вид кривой постоянен практически для всех степеней деформации. В первом случае, при $\xi = 2.0$, – это квадратичная

парабола. Во втором и третьем случаях, т.е. при $\xi = 20.0$ и $\xi = 140.0$ соответственно, – это сплайновые кривые – 1. Во втором и третьем случаях можно считать, что экспериментальные точки колеблются вокруг линии 2, образуемой функцией (1). Поэтому и точка восстанавливаемой кривой с большой степенью вероятности находится в ближайших окрестностях этой линии или принадлежит ей.

После восстановления значений сопротивления деформации в трех «узлах» сетки (табл. 1.) появляется возможность провести расчет кривых, соответствующих скорости деформации $\xi = 0.5 \text{ c}^{-1}$ и температурам 1100 и 1200°C .

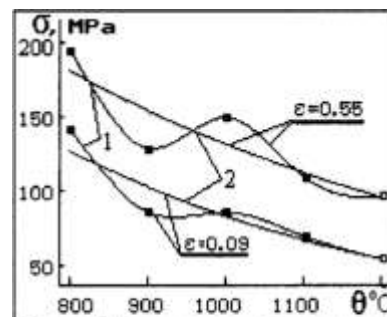


Рисунок 2. К схеме восстановления кривых текучести при температуре 1200 °С и скорости деформации $\xi = 140 \text{ c}^{-1}$
1 - сплайн, 2 - функция (1)
■ - экспериментальные точки,
□ - расчетные точки.

При фиксированных значениях степе-
ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК 1/1-2012

ПОСТРОЕНИЕ РЕГУЛЯРНЫХ МАССИВОВ КРИВЫХ ТЕКУЧЕСТИ МАЛОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

ни деформации экспериментальные и предварительно рассчитанные кривые дают точки для построения кинематических зависимостей вида

$$\sigma_s = A \xi^n, \quad (2)$$

где $A = \sigma_0 / \xi_0^n$; σ_0 – сопротивление деформации при статической скорости деформации; ξ_0 – статическая скорость деформации. Кинема-

тические кривые сопротивления деформации выводятся на экран в полулогарифмической системе координат. Проведенная обработка экспериментальных кривых дала возможность получить данные, охватывающие регулярную область по всем выбранным интервалам значений температур и скоростей деформаций. Итоговая совокупность кривых представлена на рис. 4.

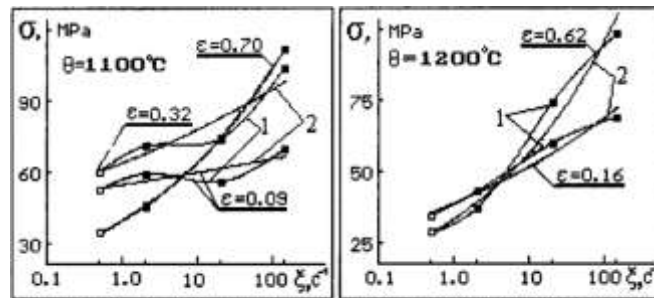


Рисунок 3. К схеме восстановления кривых текучести с помощью кинематической зависимости (2) при температурах 1100 и 1200 °С. 1 - сплайн, 2 - функция 2. ■ - экспериментальные точки, □ - расчетные точки.

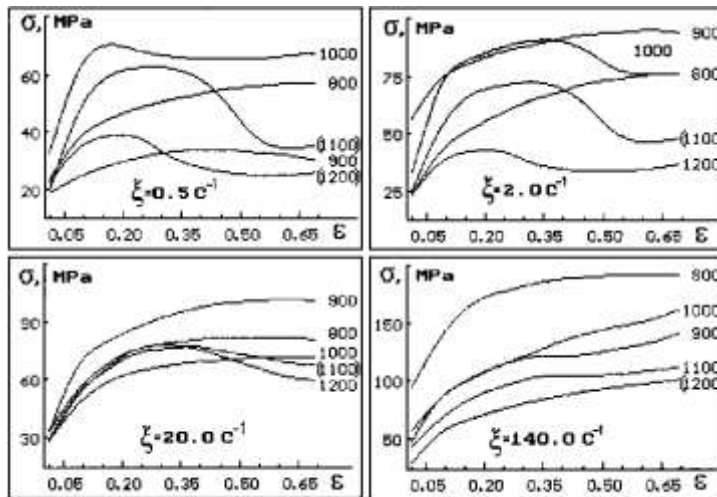


Рисунок 4. Экспериментальные [1] и расчетные (1100), (1200) кривые сопротивления деформации стали (01).

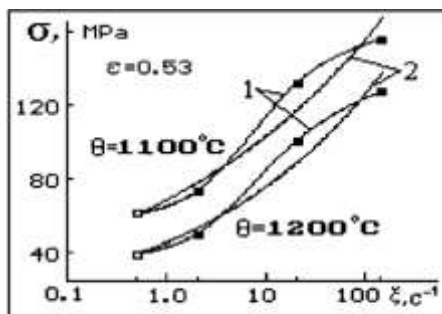


Рисунок 5. Аппроксимация точек экспериментальных кривых текучести стали (03) функцией (2) и интерполяция кинематических кривых кубическими сплайнами (1) при степени деформации $\epsilon = 0.53$.

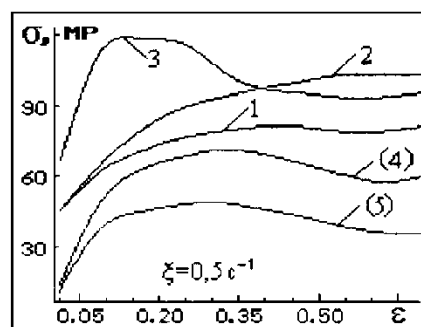


Рисунок 6. Экспериментальные [1] и расчетные (4),(5) кривые текучести стали(03), соответствующие скорости деформации $\xi = 0.5 \text{ c}^{-1}$ при температурах деформации, °С. 1 - 800, 2 - 900, 3 - 1000, 4 - 1100, 5 - 1200.

Вид восстановленных кривых текучести в полной мере согласуется с видом окружающих линий, полученных экспериментальным путем. При $\xi = 0.5 \text{ с}^{-1}$, две кривые (1100), (1200) являются расчетными и существенно отличаются от экспериментальных, но показывают такой же характер изменения сопротивления деформации, как и кривые (1000), (1200) при $\xi = 2 \text{ с}^{-1}$. На этом же рисунке аналогичную форму имеет расчетная кривая (1100). Линии (1200) при $\xi = 0.5$ и $\xi = 140 \text{ с}^{-1}$ являются расчетными, а при $\xi = 2$ и $\xi = 20$ - экспериментальными, но они своей формой отражают известный факт, что с увеличением скорости деформации процесс разупрочнения не успевает развиваться, а тепловой эффект, в связи с малым сопротивлением деформированию при большой температуре, незначителен. Восстановление регулярной области определения кривых текучести стали (03), осуществлялась по кинематическим кривым, так как зависимости $\sigma_s = \sigma_s(\xi)$ при $\theta = 1100^\circ\text{C}$, 1200°C (рис. 5) в большей мере соответствует известным представлениям о влиянии скорости деформации на сопротивление деформации, чем по зависимостям $\sigma_s = \sigma_s(\theta)$ при $\xi = 0.5 \text{ с}^{-1}$, которые в данном случае показывают рост сопротивления деформации при росте температуры от 800 до 1000°C [1].

Широкий интервал изменений значений ξ и небольшое расстояние между крайней экспериментальной точкой ($\xi = 2 \text{ с}^{-1}$) и точкой, в которой происходит восстановление кривой, позволяет предположить, что расчетная кривая достаточно достоверно отражает реальные свойства стали. Результаты построения расчетных кривых стали (03) иллюстрируются графиками рис. 6.

Восполнение данных по стали 08 при температуре 1100°C проводилось с помощью функции (1). Соотношение между аппроксимирующей линией, экспериментальными точками и результатами сплайновой интерполяции отражены на рисунке 7. Относительно небольшая осцилляция экспериментальных данных точек вокруг аппроксимирующей линии, позволяет утверждать, что рассчитанные значения сопротивления деформации недалеки от истинных.

Экстраполяция закономерностей изменения σ_s в зависимости от изменений ξ на более высокий уровень значений ($\xi = 100 \text{ с}^{-1}$) с помощью кинематической функции (2) (см. рис. 8) позволяет, в рассматриваемом слу-

чае, получить кривые вида «К» (рис. 9). В результате сглаживания, последние трансформируются в линии, характерные для экспериментальных кривых текучести стали 08.

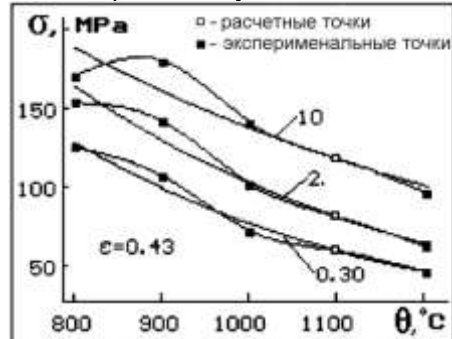


Рисунок 7. Аппроксимация точек экспериментальных кривых текучести стали 08 и их интерполяция кубическими сплайнами при степени деформации $\epsilon = 0.43$ и скоростях деформации $\xi = 0.3, 2.0, 10 \text{ с}^{-1}$

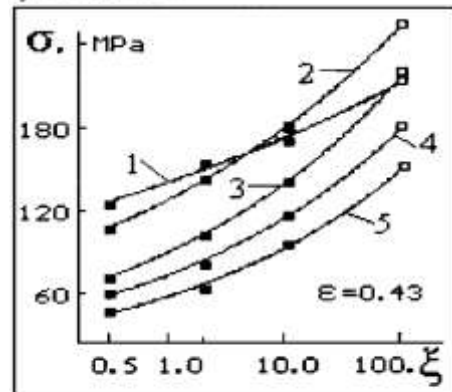


Рисунок 8. К схеме восстановления кривых текучести стали 08 с помощью кинематических кривых, соответствующих степени деформации $\epsilon = 0.43$

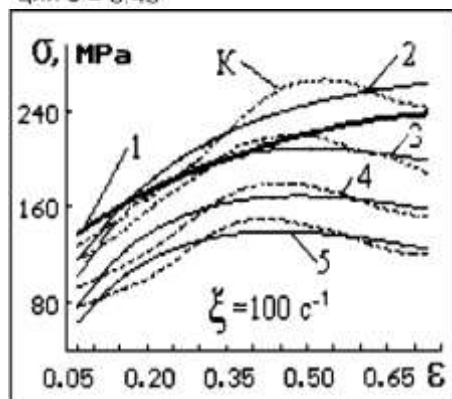


Рисунок 9. Восстановленные и сглаженные кривые текучести стали 08 при температурах деформации, С: 1 - 800; 2 - 900; 3 - 1000; 4 - 1100; 5 - 1200.

ПОСТРОЕНИЕ РЕГУЛЯРНЫХ МАССИВОВ КРИВЫХ ТЕКУЧЕСТИ МАЛОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

Выбор, в качестве сглаживающей, одной из трех функций:

$$\sigma_s = b - (b - a) \exp(-c\varepsilon). \quad (3)$$

$$\sigma_s = a\varepsilon^b \exp(-c\varepsilon), \quad (4)$$

$$\sigma_s = a\varepsilon^b \quad (5)$$

осуществляется по минимальному значению суммы квадратов отклонений для 10 - 12 точек, равномерно распределенных по длине кривой.

Восстановление кривых текучести стали 12 выполнялось с помощью кинематических зависимостей для температур $\theta = 800$ и 1200 °С и с помощью температурных зависимостей для скоростей деформаций $\xi = 0.8$ с⁻¹ и $\xi = 100$ с⁻¹. С учетом известного качественного влияния температуры и скорости деформации на сопротивление деформации, положение расчетных точек в большинстве случаев оказывается правдоподобным при аппроксимации экспериментальных точек квадратичной параболой, но при восстановлении точек, соответствующих температуре 800°С, проявляется закономерность отражаемая формулой (2). О виде кинематических и температурных кривых и характере соотношений между линиями и экспериментальными точками даёт представление рис. 10.

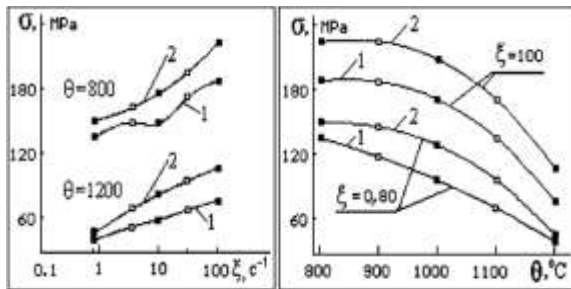


Рисунок 10. Кривые восстановления кривых текучести стали 12 с помощью кинематических и температурных кривых при степенях деформации: 1 - $\xi = 0.13$; 2 - $\xi = 0.51$

Можно отметить, что план экспериментов стали 12, отражаемый таблицей 1, позволяет провести расчет кривых для точек пространства температура – скорость деформации (1200, 3,5) и (1200, 30), как с помощью кинематических зависимостей – интерполяцией, что было показано выше, так и с помощью температурных зависимостей. Визуальное сравнение результатов полученных решений, см. рис.11, говорит о существенном различии между кривыми, полученными с помощью температурных зависимостей. При создании базы данных предпочтительнее отдано результатам, полученным интер-

поляцией.

Результаты восстановления регулярной области определения кривых упрочнения стали 12 представлены на рис. 12. Вид расчетных кривых соответствует виду экспериментальных кривых и отражает общие закономерности зависимости сопротивления деформации от степени, скорости и температуры деформации.

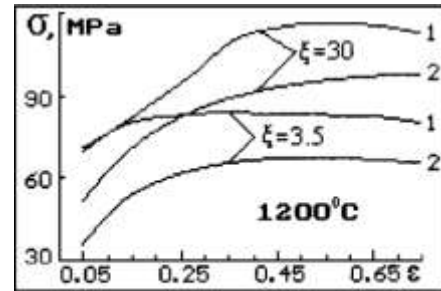


Рисунок 11. Сравнение кривых текучести стали 12, построенных экстраполяцией -1 и интерполяцией -2.

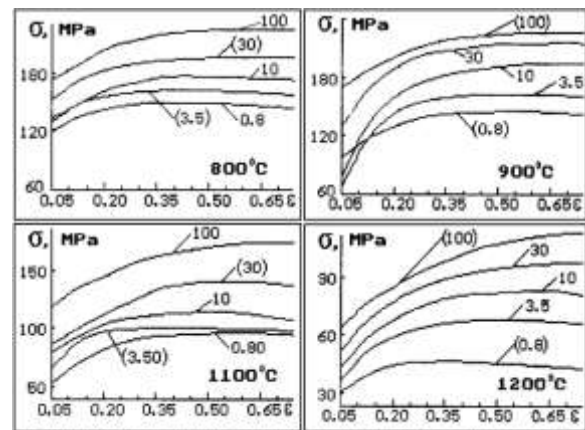


Рисунок 12. Расчетные (...) и экспериментальные [1] кривые текучести стали 12

Расширения области определения кривых текучести стали 15 в области изменения температуры осуществлялось экстраполяцией экспериментальных данных с помощью температурной зависимости (1). Вид температурных кривых достаточно полно отражен графиками на рис. 13а. Дополнение массива кривых текучести стали 15 несколько другого химического состава, обозначенной (15с), было проведено экстраполяцией экспериментальных данных с помощью логарифмированной кинематической зависимости (2). Соотношение между аппроксимирующими линиями и экспериментальными и расчетными точками для стали этого химического состава отражено на рис. 13б.

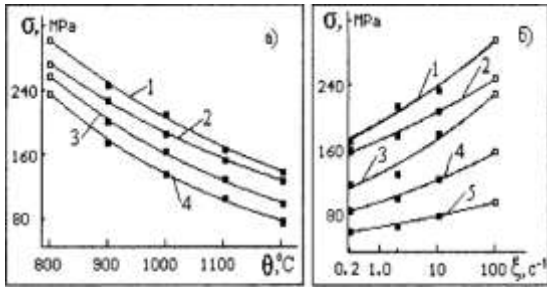


Рисунок 13. К сравню восстановления кривых текучести сталей 15-а) и 15с-б) с помощью температурной (1) и кинематической (2) зависимостей
 а) 1 - $\epsilon=0.67, \xi=100 \text{ c}^{-1}$; 2 - $\epsilon=0.60, \xi=40 \text{ c}^{-1}$; 3 - $\epsilon=0.52, \xi=8 \text{ c}^{-1}$; 4 - $\epsilon=0.38, \xi=1.5 \text{ c}^{-1}$;
 б) 1 - $\epsilon=0.61, \theta=800^\circ\text{C}$; 2 - $\epsilon=0.55, \theta=900^\circ\text{C}$; 3 - $\epsilon=0.55, \theta=1000^\circ\text{C}$; 4 - $\epsilon=0.43, \theta=1100^\circ\text{C}$; 5 - $\epsilon=0.12, \theta=1200^\circ\text{C}$.

Узкий интервал аппроксимации при построении кинематических зависимостей (2) отразился на восстановленных кривых таким образом, что эти кривые требовали сглаживания. В то же время кривые, построенные с помощью температурной зависимости (1), в такой обработке не нуждались. Результаты дообработки экспериментальных данных стали 15 представлены кривыми текучести на рис. 14

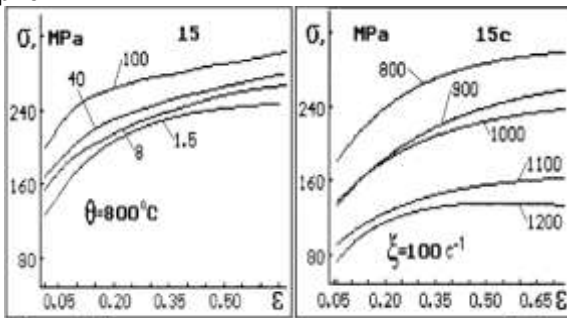


Рисунок 14. Расчеты, дополняющие исходные, кривые упрочнения стали 15 и 15с.

Наличие двух регулярных массивов кривых текучести стали 15, с различием по химическому составу в пределах допускаемых ГОСТом, позволяет с помощью программного обеспечения легко сравнить результаты двух экспериментов путем построения кривых при одинаковой скорости ($\xi = 100 \text{ c}^{-1}$) и одинаковых температурах деформации (рис. 15).

Характер соотношений между кривыми позволяет сделать вывод, что результаты расчета и эксперимента в некоторой степени совпадают, а сами кривые принадлежат некоторой более общей совокупности данных и могут быть представлены в виде семейства, построенного на кривых от средних значений сопротивлений деформаций (см. рис.16). Построение кривых выполнено в программе KSV436 [3]

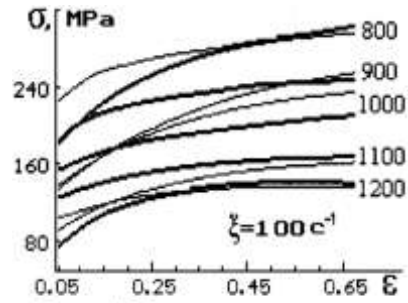


Рисунок 15. Сравнение кривых текучести стали 15 (—) и стали 15с (—) при скорости деформации $\xi=100 \text{ c}^{-1}$.

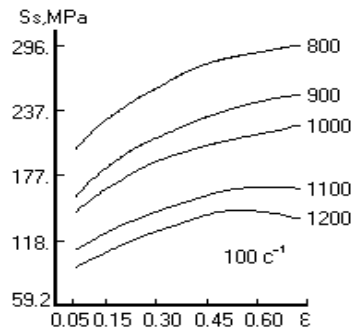


Рисунок 16. Кривые упрочнения стали 15, построенные усреднением исходных кривых

Результаты предварительной обработки кривых упрочнения сталей (01), (03), 08, 12, 15, (15с), позволяют с помощью программы KSV435 [4] построить семейство кривых упрочнения в существенно более расширенной области определения по скоростям деформации, как, например, показано на примере стали 08 на рисунке 17. Можно отметить, что на рисунке 17 в данном случае расчетные кривые сохраняют ту особенность экспериментальных кривых [1], которая выражается в более высоком сопротивлении деформации при температуре 900°C , чем при температуре $850, 800^\circ\text{C}$.

Не представляет затруднения с помощью той же программы построить кривые упрочнения, соответствующие, например, температурам 850 и 950°C (см. рис.18).

С помощью программы KSV437 [5] выполнено исследование по аналитическому представлению отдельных кривых и семейств кривых рассматриваемой группы сталей. Подтверждено, что в интервале изменения степеней деформаций $\epsilon = (0.05 \dots 0.45 - 0.75)$ отдельные кривые с высокой степенью точности описываются функцией [6]

ПОСТРОЕНИЕ РЕГУЛЯРНЫХ МАССИВОВ КРИВЫХ ТЕКУЧЕСТИ МАЛОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

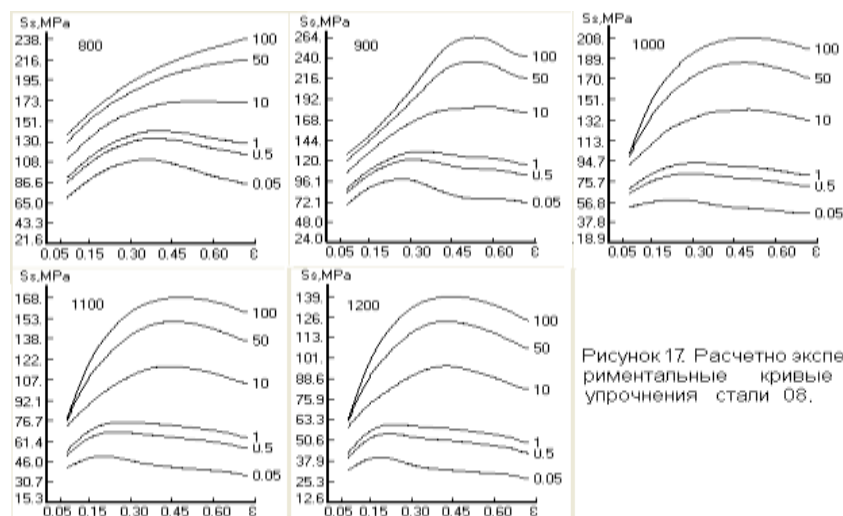


Рисунок 17. Расчетно экспериментальные кривые упрочнения стали 08.

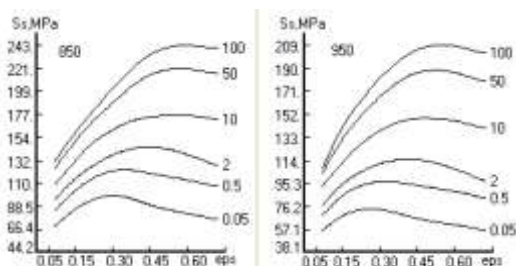


Рисунок 18. Расчетные кривые упрочнения стали 08, построенные аппроксимацией исходных кривых [1].

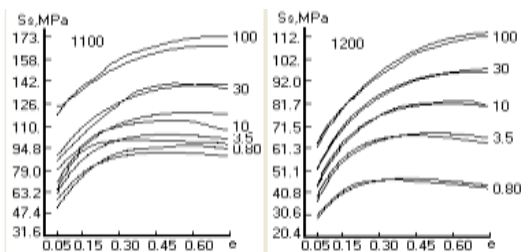


Рисунок 19. Аппроксимация кривых упрочнения стали 12 полиномиальной зависимостью 5 - й степени. (Расчетные кривые более гладкие)

$$\sigma_s = A\varepsilon^\alpha \exp(-\beta\varepsilon) + B\varepsilon^\gamma \exp(-\delta\varepsilon), \quad (3)$$

где A , α , β , B , γ , δ – эмпирические коэффициенты. Например, кривая упрочнения стали 08, при $\theta = 900^\circ\text{C}$, $\xi = 2 \text{ c}^{-1}$, может быть описана функцией (3) с коэффициентами $A = 254.77$, $\alpha = 0.36173$, $\beta = 1.0733$, $B = 253070$, $\gamma = 5.2720$, $\delta = 11.238$. При этом сумма квадратов отклонений между исходной и расчетной кривой по 10 – ти точкам составляет 1.88 МПа.

Установлено, что построение простых зависимостей сопротивления деформации от степени ε , скорости ξ и температуры θ деформации возможно только в узкой области определения кривых. Только переход к зависимости $S = P_5(X_1, X_2, X_3)$, где $S = \ln\sigma_s$, $X_1 = \ln\varepsilon$, $X_2 = \ln\xi$, $X_3 = \theta/1000$, позволил получить результат, характеризуемый рисунком 19 и подтверждением адекватности модели по критерию Фишера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полухин П. И. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов. Справочник/ П. И. Полухин, Г. Я. Гун, А. М. Галкин. – М.:

Металлургия, 1983. – С.352.

2. Перевод графического представления кривых упрочнения в численное представление(KSV432) / Свидетельство о гос. рег. программы для ЭВМ №2009614866.

3. Построение, визуальное сравнение и усреднение кривых текучести (KSV436). / Свидетельство о гос. рег. программы для ЭВМ №2010615621.

4. Расширение области определения кривых текучести по температурам и скоростям деформации с выбором аппроксимирующих зависимостей (KSV435) / Свидетельство о гос. рег. программы для ЭВМ №2009617035.

5. Аналитическое представление экспериментальных и расчетных кривых упрочнения (KSV437) / Свидетельство о гос. рег. программы для ЭВМ №2011610956.

6. Карпов С. В. Сопротивление деформации сплава ХН50МВКТЮР при горячей обработке./ Ползуновский альманах №3 – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2006. – с.149 -152.

С.В. Карпов, к.т.н., доцент,
e-mail: MTiOKSV@yandex.ru

ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»,