

АНАЛИЗ КРИВЫХ УПРОЧНЕНИЯ СТАЛИ 15, ПОЛУЧЕННЫХ В РАЗНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ

С. В. Карпов

Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова,
г. Барнаул, Россия

Определение требуемого усилия 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 $\dot{\epsilon}$ и температуры θ °C. Наиболее полно результаты экспериментального построения кривых упрочнения представлены в справочнике [1].

В настоящей статье представлен результат обработки кривых упрочнения малоуглеродистой стали 15, полученных в трех экспериментах (рисунок 1 – 3). Кривые на рисунок 1 определены в диапазоне температур от 800 до 1200 °C и при скоростях деформации 0.3, 2.0, 10 с⁻¹. Кривые на рисунок 2 при температурах 900, ..., 1200 °C и скоростях деформации 1.5, 8, 40, 100 с⁻¹. На рисунок 3 отображены кривые при температурах 800 и 1200 °C и скоростях деформации 0.2, 0.8, 3.5, 10, 30, 100 с⁻¹, при температуре 1000 °C и скоростях 0.2, 3.5, 30 с⁻¹. Один из возможных вопросов, возникающих при анализе рисунков, состоит в сравнении результатов экспериментов.

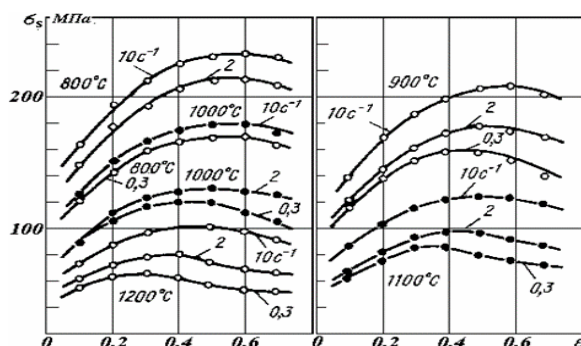


Рисунок 1 – Кривые испытаний на сжатие стали 15 [1] (0.27Si, 0.48Mn, 0.014P, 0.03S, 0.27Cu, 0.1 Ni, 0.7Cr)

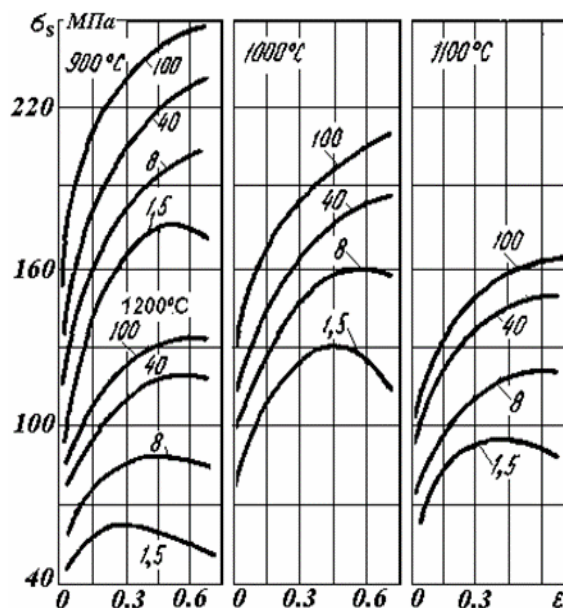


Рисунок 2 – Кривые испытаний на сжатие образцов из стали 15 [1] (0.15Si, 0.68Mn, 0.34S, 0.29P)

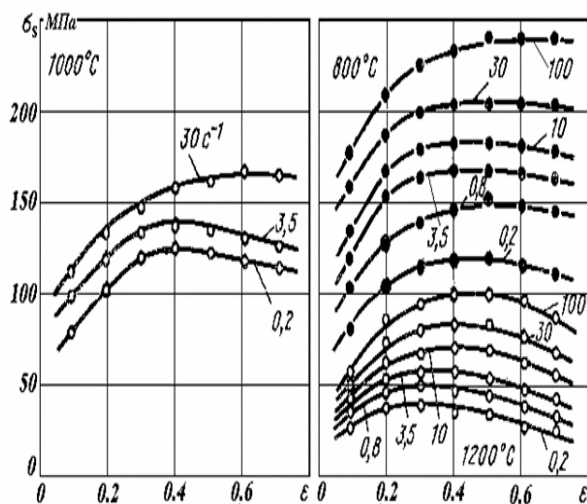


Рисунок 3. Кривые испытаний на сжатие образцов стали 15 [1] (0.40Mn, 0.01P, 0.016S)

Рисунок 3 – Кривые испытаний на сжатие стали 15 [1] (0.40Mn, 0.01P, 0.016S)

Для сравнения кривых выбрана область определения, включающая температуры 800, 900, 1000, 1100, 1200 °С и скорости деформации: 0.05, 0.3, 2, 10, 50, 100 с⁻¹. В дальнейшем в статье использованы обозначения: сталь рисунка 1, как сталь 1, рисунка 2, как сталь 2, рисунка 3, как сталь 3. Преобразование кривых выполнено в следующей последовательности. Прежде всего совокупности кривых рисунков 1 – 3 преобразованы в текстовые файлы, содержащих массивы координат в системе σ S ~ ϵ при фиксированных значениях температуры и скорости деформации. Оцифрование кривых выполнялось программой KSV432 [2]. Проверка, возможности изменения областей определения сталей, выполнялась программой KSV435 [3] с помощью кинематических: $\sigma S = a_0 + a_1x$; $\sigma S = b_0 + b_1x + b_2x^2$; $\sigma S = c_0 + c_1x + c_2x^2 + c_3x^3$, где $x = \ln \cdot$, и аналогичных температурных зависимостей, где $x = \theta/1000$ °С. Кроме этого кинематические зависимости были представлены функцией

$$\sigma S = \exp(d_1 + d_2 \cdot (x - \ln 0.01) \cdot \ln 10). \quad (1)$$

А температурные зависимости функцией

$$\sigma S = B_0 \cdot \exp(B_1 \cdot (1 - x)). \quad (2)$$

Расчет неизвестных коэффициентов $a_0, a_1, b_0, b_1, b_2, \dots, B_0, B_1$ в программе KSV435 производится аппроксимацией экспериментальных значений сопротивлений деформации не менее чем по трём точкам. Для выбора аппроксимирующих зависимостей используется «окно выбора функций» – 1 (рисунок 4). Подбор функций может выполняться многократно. Окончательный выбор экстраполирующей зависимости, как по скоростям, так и температурам определяется визуально и происходит после нажатия на кнопки «выбор окончен spline» или «выбор окончен».

При этом на экстраполирующую кривую наносятся точки, соответствующие значениям сопротивления деформации при дополнительно введенных, в данном случае, значениях скорости деформации. Эти скорости также можем видеть в окне ввода дополнительных значений: 0.05 50 100 и можем видеть в виде точек на оси lgV окна 1. При завершении выбора экстраполирующей кривой фиксируется значения сопротивления деформации, соответствующие только экстраполирующей зависимости (кнопка «Выбор окончен»), как на рисунке 4, окно 2. Или зна-

чения сопротивления деформации будут соответствовать точкам сплайна (кнопка с spline). Контролируемое восстановление кривых упрочнения, соответствующих трём рисункам с помощью кинематических кривых показывает, что экспериментальные точки кинематических кривых в данном случае достаточно точно описываются функцией (1) или уравнением прямой линии.

Вид формы для построения температурных кривых аналогичен виду формы для кинематических кривых (рисунок 5). Построение температурных кривых, начинается с обращения к команде Кривые Т. После этого, задаются размеры окон для предварительного и окончательного построения аппроксимирующей и одновременно экстраполирующей кривой. Задаётся номер скорости деформации. Вводятся дополнительные значения температур, например, 900, 1100 °С. Эти значения температур наносятся на ось температур в первом окне. А после окончания подбора функции, перемещаются на кривую во втором окне. При этом в программе фиксируются значения сопротивлений деформации, соответствующие заданной скорости и степени деформации базовых точек экспериментальных кривых. То есть в данном случае восстанавливаются кривые упрочнения, соответствующие температурам деформации 900 и 1100 °С. Рисунок 5 также показывает, что температурная кривая может быть описана не только экспоненциальной функцией [1], но и кубической параболой. Наличие значений сопротивлений деформаций в трёх точках пространства температур при одних и тех же значениях скорости деформации позволяет с помощью программы KSV435 получить расчетные кривые упрочнения при других (в принципе любых) значениях температуры.

В результате восстановления кривых упрочнения стали 3 (15) при температуре 1000 °С с помощью кинематических кривых, а также восстановления кривых упрочнения, соответствующих температурам 900 и 1100 °С помощью температурных кривых получена регулярная область определения кривых упрочнения на основе рисунка 44 [1]. Вид экспериментальных (0.2, 3.5 и 30 с⁻¹) дополнительных расчетных кривых (0.8, 10, 100 с⁻¹) представлен на рисунке 6.

АНАЛИЗ КРИВЫХ УПРОЧНЕНИЯ СТАЛИ 15, ПОЛУЧЕННЫХ В РАЗНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ

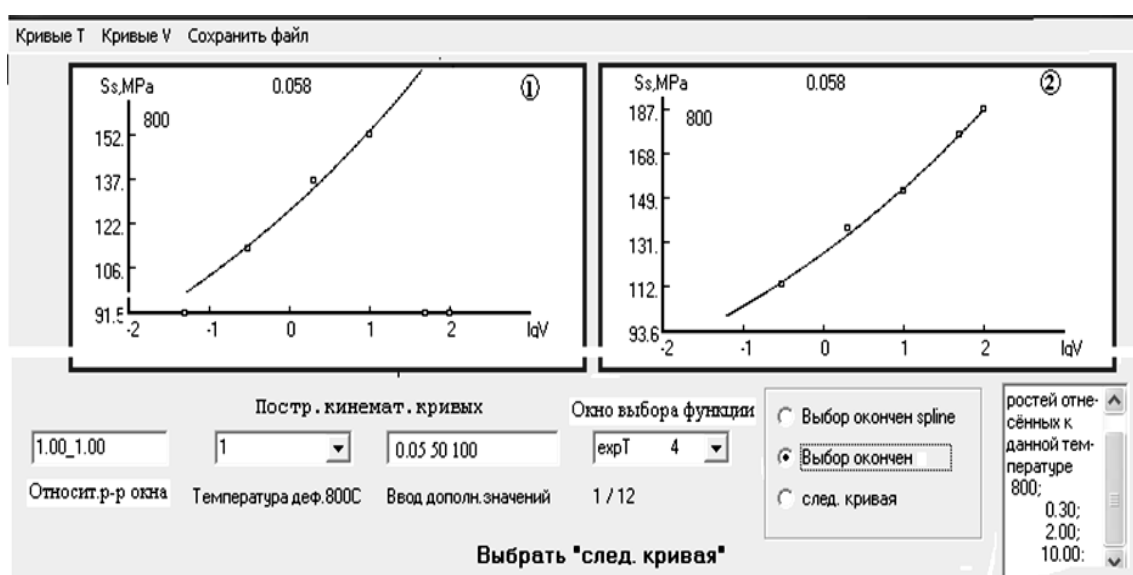


Рисунок 4 – Фрагмент формы с кинетической кривой упрочнения стали 1 при температуре 800 °С и степени деформации $\epsilon = 0.058$: 1 – окно подбора аппроксимирующих функций; 2 – окно выбранной зависимости

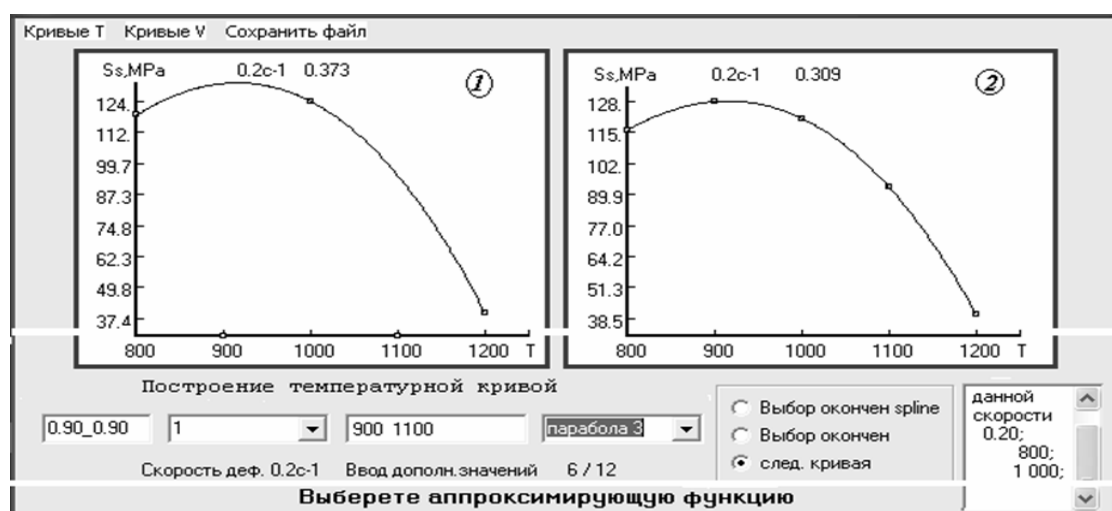


Рисунок 5 – Фрагмент формы при построении температурной кривой упрочнения стали 15 (3)

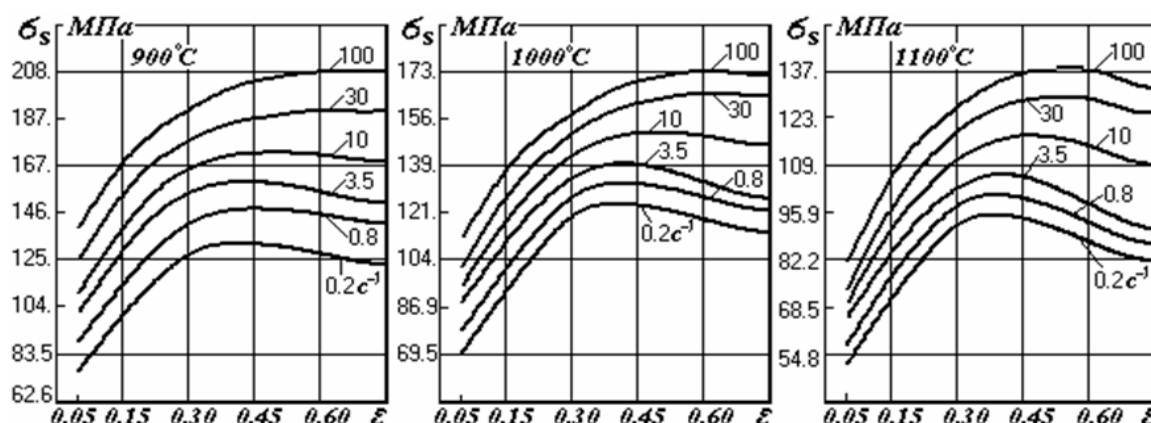


Рисунок 6 – Расчетные кривые упрочнения стали 3 (15), построенные на основе кривых рисунка 3

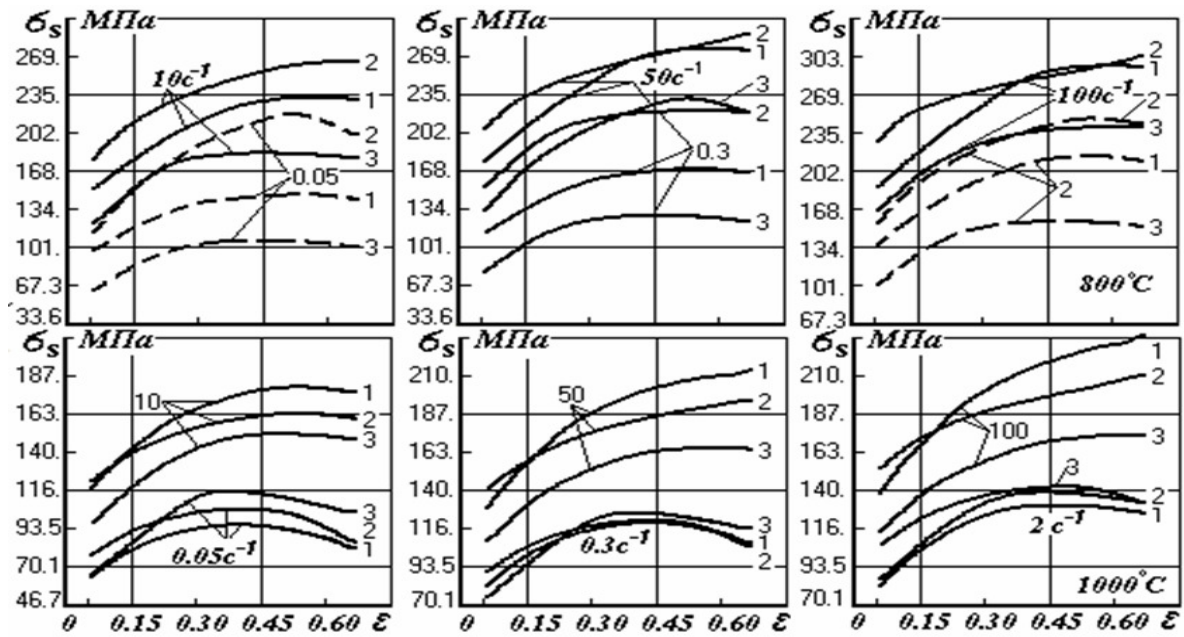


Рисунок 7 – Сравнение сопротивлений деформации стали 15, проявившихся в трех экспериментах: 1 – по рисунку 42; по рисунку 43; по рисунку 44

Дальнейшая обработка кривых осуществляется с помощью программы [4]. Программой предусмотрен ввод нужного количества предварительно обработанных файлов, задание количества и значений температур новой области определения кривых упрочнения, задание количества скоростей, отнесённых к одной температуре и значения этих скоростей, например, как оговорено в начале статьи. Программой выполняется расчет сопротивления деформаций во всех назначенных точках поля температур и поля скоростей деформаций. Результаты расчетов могут быть представлены виде семейств кривых по файлам (маркам

стали) или непосредственно сравниваемых кривых. Фрагмент результатов такого сравнения показан на рисунке 7. По результатам сравнения кривых можно предположить, что значение сопротивлений деформации при колебании химического состава в пределах, рекомендуемых ГОСТом, колеблются вокруг некоторых средних значений. Такие усредненные значения свойств отражаются в кривых рисунок 8. Кривые упрочнения могут быть довольно точно воспроизведены на основе функции (3), коэффициенты которой, представленные в ниже расположенной таблице, рассчитаны с помощью программы [5].

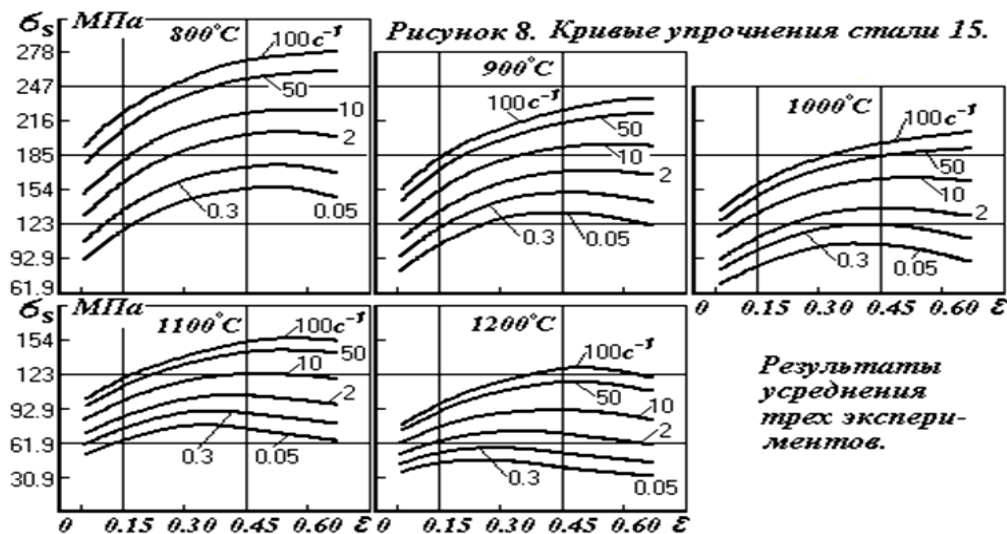


Рисунок 8 – Кривые упрочнения стали 15

АНАЛИЗ КРИВЫХ УПРОЧНЕНИЯ СТАЛИ 15, ПОЛУЧЕННЫХ В РАЗНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ

Таблица 1 – Коэффициенты функции (3) кривых упрочнения

температура	скорость	коэффициенты						Сумма квадратов отклонений
		G ₁	G ₂	G ₃	G ₄	G ₅	G ₆	
800	0.05	164.2	0.1893	1.3776	925.0	1.766	2.371	4.7285
	0.30	157.1	0.1287	1.6805	733.1	1.416	1.783	2.7628
	2	186.6	0.1217	1.6012	712.6	1.364	1.566	1.2230
	10	41.2	0.2478	2.1189	465.8	0.606	0.790	0.4324
	50	65.9	0.1774	2.2375	481.6	0.597	0.656	0.5411
	100	200.2	0.0357	1.5529	565.5	1.004	0.895	1.9654
900	0.05	126.6	0.1492	0.4129	1405	2.123	4.134	0.5152
	0.30	146.9	0.1492	0.2946	1325.7	2.146	4.169	0.2565
	2	143.4	0.0984	0.2411	585.8	1.612	2.618	0.1951
	10	129.5	0.0408	0.0065	361.8	1.127	1.817	0.4109
	50	139.7	0.0289	0.1292	250.4	0.883	0.922	1.2821
	100	173.6	0.0622	0.4448	257.8	0.971	0.707	1.5467
1000	0.05	98.6	0.1176	1.4783	950.4	1.766	3.024	0.2605
	0.30	115.2	0.1131	1.1109	795.8	1.717	2.738	0.1578
	2	106.7	0.0656	0.2164	630.4	1.624	2.988	0.1720
	10	137.7	0.0772	0.1368	509.8	1.628	2.738	0.1866
	50	150.5	0.0689	-0.1841	580.2	1.769	3.692	0.1461
	100	162.2	0.0706	-0.2305	507.0	1.730	3.849	0.2076
1100	0.05	97.9	0.2081	0.5356	291395	5.128	13.414	0.2688
	0.30	107.0	0.1850	0.3895	98662	4.612	11.738	0.2751
	2	116.1	0.1651	0.2921	17736.3	3.882	8.782	0.2151
	10	113.1	0.1055	0.1883	841.9	2.098	3.898	0.1821
	50	142.1	0.1305	0.5817	643.9	1.986	2.519	0.7713
	100	164.0	0.1536	0.7398	809.0	2.166	2.542	1.6705
1200	0.05	38.4	0.0396	0.3666	1368.6	2.047	7.236	0.8674
	0.30	53.1	0.0797	0.3558	1082.2	2.011	6.414	0.3266
	2	83.3	0.1503	0.5021	3728.4	2.951	7.429	0.2286
	10	81.5	0.0991	1.1064	375.2	1.423	2.160	0.6313
	50	127.7	0.1702	1.4137	1041.6	2.043	2.868	1.8515
	100	159.9	0.2178	1.5181	1793.0	2.408	3.332	3.7601

Список литературы:

1. Полухин П. И. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов [текст]. Справочник / Полухин П. И., Гун Г. Я., Галкин А. М. – М: Металлургия, 1983 - с.352.
2. Перевод графического представления кривых упрочнения в численное представление (KSV432): Свидетельство о гос. рег. программы для ЭВМ /авт. С.В.Карпов; правообладатель Алт.гос.техн.ун-т им. И.И. Ползунова - №2009616025; заявка №2009614866; зарегистр. 30.10.2009.
3. Расширение области определения кривых текучести по температурам и скоростям деформации с выбором аппроксимирующих функций и экстраполирующих зависимостей (KSV435): Свидетельство о гос. рег. программы для ЭВМ/ авт. С.В. Карпов; пра-

вообладатель Алт.гос.техн.ун-т им. И.И. Ползунова - №2010614797; заявка №2010613210; зарегистр. 23.07.2010.

4. Построение, визуальное сравнение и усреднение кривых текучести на основе предварительно обработанных экспериментальных кривых (KSV436): Свидетельство о гос. рег. программы для ЭВМ / авт. С.В. Карпов; правообладатель Алт.гос.техн.ун-т им. И.И. Ползунова - №2010617358; заявка №2010615621; зарегистр. 09.11.2010.

5. Аналитическое представление экспериментальных и расчетных кривых упрочнения(KSV437): Свидетельство о гос. рег. программы для ЭВМ / авт. С.В. Карпов; правообладатель Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова - №2011610956; заявка №2010617480; зарегистр. 25.01.2011.