

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ им. Акаде-
мика С.П. КОРОЛЕВА

*Упрочнение металлов
при статическом растяжении*

Методические указания
К домашнему заданию

г. Самара 2002 г.

Составители В.В. Уваров, Р. Заббаров

УДК 620.017:539.3

Упрочнение металлов при статическом растяжении: Метод. указания к домашнему за-
данию/ Самар. гос. аэрокосмич.ун-т;
Сост. В.В. Уваров, Р. Заббаров. Самара. 2002 г. 13 с.

Предусматривается изучение метода и техники построения диаграмм истинных напря-
жений и их аппроксимации.

Указания предназначены для студентов специальности 11.06 и 12.04 дневной и вечерней форм обучения. Кроме того, они могут быть использованы в области технологической подготовки студентов по авиационным специальностям.
Выполнены на кафедре "Технология металлов и авиаматериаловедение".

Печатаются по решению редакционно-издательского совета Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королева

Рецензент И.П. Попов

Домашнее задание включает построение диаграмм истинных напряжений (кривых упрочнения) двумя способами, проверку правильности их построения, определение коэффициентов линейной и степенной аппроксимации экспериментальных кривых, сравнение экспериментальных и аппроксимирующих кривых и оценку точности аппроксимации.

1. ПОСТРОЕНИЕ КРИВЫХ УПРОЧНЕНИЯ

Испытание на статическое растяжение позволяет изучить эффект упрочнения (наклепа) металла в процессе холодного деформирования с помощью кривых упрочнения. Они строятся в координатах $\sigma_i - \varepsilon_i$ и характеризуют истинное сопротивление металла деформированию. В зависимости от вида деформации ε_i различают диаграммы истинных напряжений первого $\sigma_i = f(\delta_i)$, второго $\sigma_i = f(\psi_i)$, и третьего $\sigma_i = f(e_i)$ рода, где δ_i – относительное удлинение; ψ_i – относительное сужение; e_i - относительная логарифмическая деформация.

Между деформационными характеристиками δ_i , ψ_i и e_i существует связь: $\delta_i = \psi_i(1-\psi_i)$, $e_i = \ln(1+\delta_i)$, поэтому достаточно изучить метод построения и провести анализ одной диаграммы, чтобы перейти к любой другого вида.

Кривые упрочнения могут быть построены по результатам испытаний на растяжение различными методами. Наибольшее распространение получили два метода:

- построение кривых упрочнения по индикаторным диаграммам растяжения;
- построение методом непосредственного измерения усилий и размеров сечений в процессе растяжения образца.

1.1. Построение по индикаторным диаграммам

Исходными данными для построения диаграммы истинных напряжений первого рода является индикаторная диаграмма $P - \Delta\ell$, полученная при растяжении образца. Данный метод основан на применении графических операций. Область равномерной деформации $\Delta\ell$ на индикаторной диаграмме разделяют на n точек $n = 6-7$ (рис. 1). Находится масштаб записи по осям $\Delta\ell$ и P_i .

$$M_{\Delta\ell} = \frac{\Delta\ell_{\text{испыт.}}}{\Delta\ell_{\text{диагр. (OK')}}};$$

$$M_P = \frac{P_{\text{max испыт.}}}{P_{\text{max диагр. (d'd)}}}.$$

С помощью масштаба записи определяют, исходя из положения точек на диаграмме, абсолютные удлинения Δl и усилия P_i в каждой из точек 1, 2, 3, ..., n.

Затем вычисляют относительные удлинения испытуемого образца для выделенных точек

$$\delta_1 = \frac{\Delta l_1}{l_0}, \delta_2 = \frac{\Delta l_2}{l_0}, \dots, \delta_n = \frac{\Delta l_n}{l_0}, \dots, \delta_p = \frac{\Delta l_p}{l_0},$$

а так же его текущие площади образца

$$F_1 = \frac{F_0}{1 + \delta_1}, F_2 = \frac{F_0}{1 + \delta_2}, \dots, F_p = \frac{F_0}{1 + \delta_p}.$$

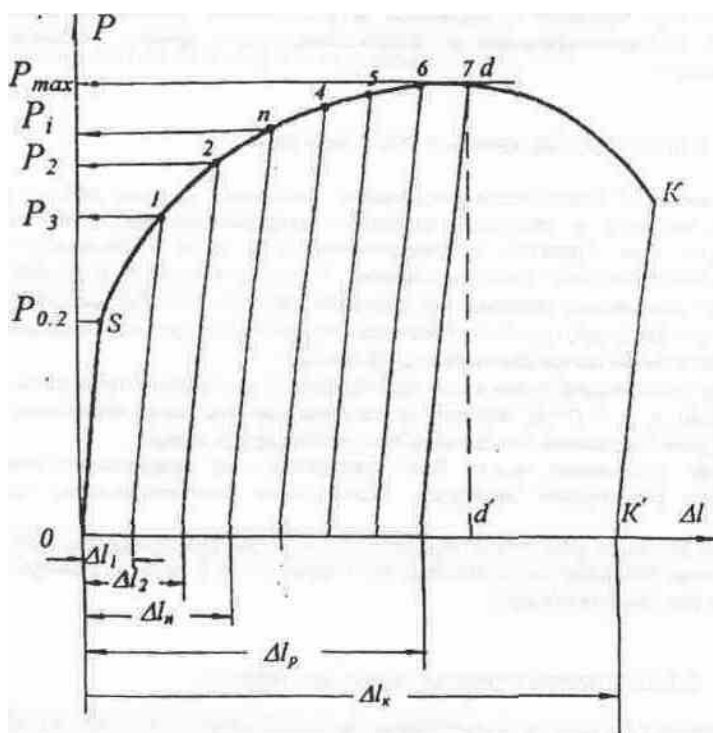


Рис. 1. Графическая обработка индикаторной диаграммы растяжения

Истинное напряжение $\sigma_i = \sigma_s^*$ получаем делением величины нагрузки на соответствующую площадь:

$$\sigma_{i1} = \frac{P_1}{F_1}, \sigma_{i2} = \frac{P_2}{F_2}, \dots, \sigma_{id} = \frac{P_{max}}{F_p}.$$

По полученным значениям σ_i и δ_i , строят кривую упрочнения первого вида в интервале равномерной деформации.

Графический метод построения довольно прост, нетрудоемок и в случае необходимости обеспечивает возможность повторного ее построения. Однако этим методом можно строить кривые упрочнения только в равномерной области, так как только для равномерной области (всего образца в целом) справедливо выражение

$$F_1 = \frac{F_0}{1 + \delta_1} = F_0(1 - \psi_1),$$

вытекающее из закона постоянства объема. Кроме того, следует иметь ввиду, что точность построения диаграммы истинных напряжений недостаточно высокая из-за применения графических приемов построения.

1.2. Построение методом измерения усилий и размеров сечения образца при растяжении

Данный метод предполагает устранить некоторые недостатки графического способа построения кривых упрочнения. В частности, появляется возможность нахождения

точек кривых упрочнения и в области сосредоточенной деформации. Кроме того, исключая графические приемы, можно несколько увеличить точность построения диаграмм истинных напряжений.

Сущность метода заключается в том, что в процессе испытания поэтапно для каждой фиксированной нагрузки измеряют поперечное сечение образца. Схема нагрузки и разгрузки на индикаторной диаграмме отображена на рис. 2.

Образец при обмере находится под уменьшенной нагрузкой P_p , составляющей 15 – 25 % той величины, которая вызвала данную пластическую деформацию. Этот прием исключает процесс релаксации. Измерения образцов до момента образования шейки производятся одновременно в нескольких сечениях, равномерно распределенных по длине образца. Для этого на расчетной длине образца перед испытанием наносят риски через равные интервалы. С момента образования шейки все измерения производят только в сечении с минимальной площадью. Из ранее измеренных сечений в области равномерной деформации оставляют для дальнейших расчетов лишь те, которые наиболее близко совпадают с положением шейки на образце.

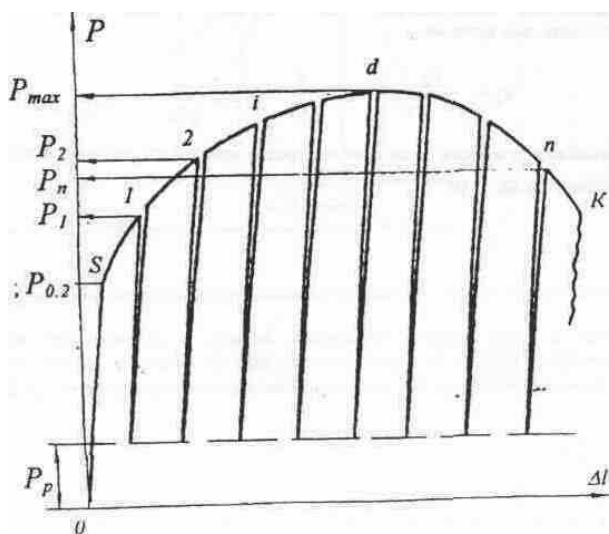


Рис. 2 . Схема нагрузки и разгрузки образца при испытании

Для определения нагрузки P в области равномерной деформации до точки d фиксируют максимальное ее значение в конце каждого этапа нагружения (перед разгрузкой) по стрелке силоизмерительного прибора разрывной машины.

После образования шейки в момент начала разгрузки усилие уже не измеряют, а фиксируют его после обмера образца лишь при вторичном нагружении, когда стрелка силоизмерителя покажет максимальное значение на данном этапе. Таким образом, в области сосредоточенной деформации сначала измеряется деформация образца, а затем при повторном нагружении – соответствующее ей усилие.

Для нахождения величины истинных напряжений в равномерной области нагрузки на каждом этапе нагружения P_1, P_2, \dots, P_d делят на соответствующую площадь сечения

$$\sigma_i = \frac{P_i}{F_i} .$$

В области сосредоточенной деформации, где реализуется схема напряжений, отличная от линейной, величина σ_i может быть подсчитана с учетом упрочнения формы по формуле:

$$\sigma_i = \frac{P_i}{F_i(1 + a/4R)} ,$$

где a – радиус наименьшего сечения в шейке (для круглого образца);

R – радиус кривизны на контуре шейки.

Величина деформации при построении кривой упрочнения оценивается относи-

тельным сужением

$$\psi_i = \frac{F_0 - F_i}{F_0} = 1 - \frac{F_i}{F_0}.$$

Данный метод в итоге позволяет построить кривую упрочнения второго вида в координатах $\sigma_i - \psi_i$.

2. ПРОВЕРКА ПРАВИЛЬНОСТИ ПОСТРОЕНИЯ КРИВЫХ УПРОЧНЕНИЯ

Для контроля правильности построения диаграмм истинных напряжений используются свойства кривых упрочнения.

Касательная, проведенная к кривой упрочнения первого вида в точке начала образования шейки, отсекает на оси координат отрезок, равный σ_B ; на оси абсцисс, слева от начала координат, отрезок, равный единице удлинения; на вертикали с координатой удлинения $\delta_i = 1$, отрезок, равный $2\sigma_B$ (рис. 3).

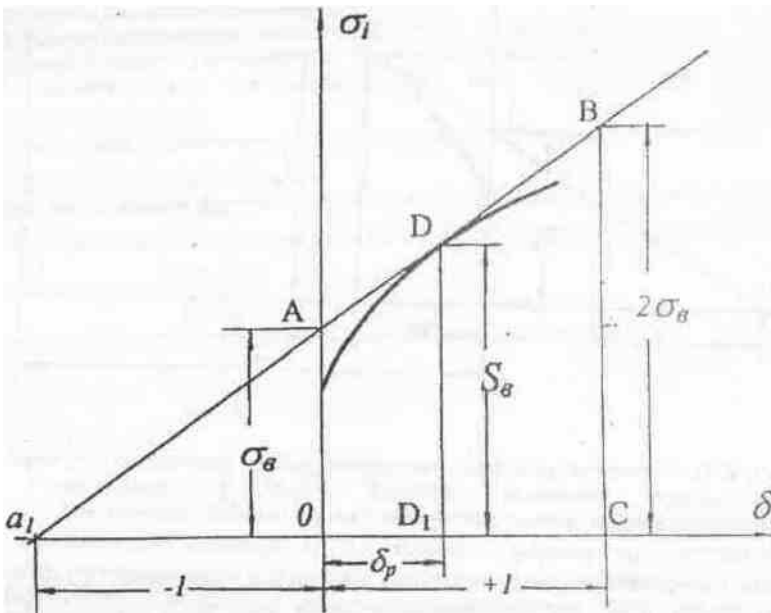


Рис. 3. Графическое представление свойств кривой упрочнения первого рода

Касательная, проведенная к кривой упрочнения второго рода в точке начала образования шейки, отсекает на оси абсцисс слева от начала координат отрезок, равный

$1 - 2\psi_p$; на вертикали с координатой сужения $\psi_i = 1$ отрезок, равный $2S_B$ (рис. 4).

Используя указанные свойства, судят о правильности построения экспериментальных кривых упрочнения. Так, для кривой упрочнения 1-го рода через В. соответствующую единице удлинения $\delta = -1$, проводят касательную к этой кривой. Затем измеряют величину полученного отрезка AO и сравнивают ее со значением σ_B . Совпадение этих величин свидетельствует о правильности построения кривой упрочнения 1-го рода.

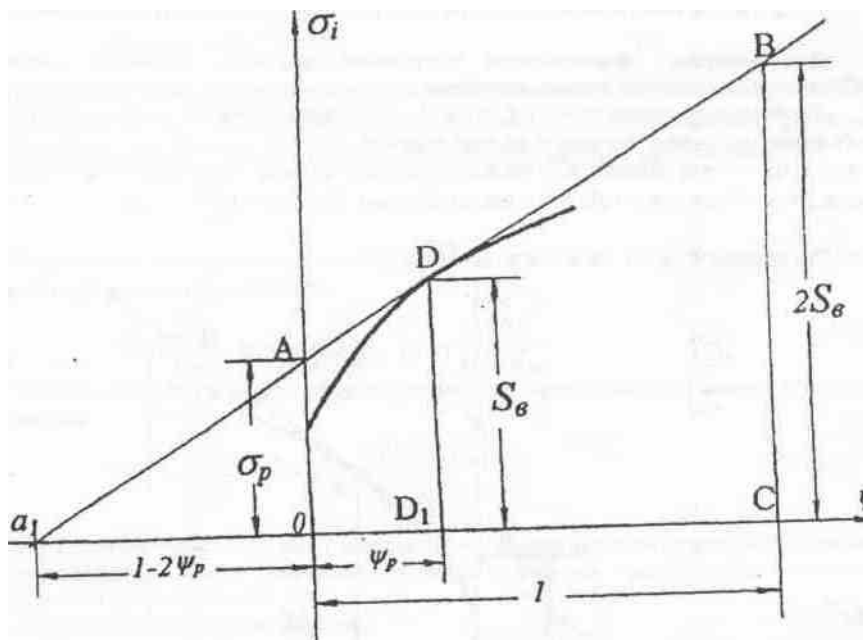


Рис. 4. Графическое представление свойств кривой упрочнения 2-го рода

Аналогично, для кривой упрочнения 2-го рода через точку В, соответствующую сужения $1 - \psi_p$, проводят касательную к кривой упрочнения. Измеряя величину отрезка EF и сравнивая ее со значением $2S_B$, оценивают правильность построения кривой упрочнения 2-го рода.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ЛИНЕЙНОЙ И СТЕПЕННОЙ

АППРОКСИМАЦИИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ КРИВЫХ УПРОЧНЕНИЯ

Кривые упрочнения позволяют учесть эффект наклепа в процессах обработки металлов давлением. Однако при аналитическом решении задач пользоваться графической зависимостью $\sigma_i = f(\varepsilon_i)$ затруднительно. Поэтому для расчетов более приемлема эта зависимость не в виде графиков, а в виде определенной математической формулы, аппроксимирующей экспериментальные кривые упрочнения.

Существует несколько видов аппроксимации кривых упрочнения, но наиболее применимы аппроксимации в виде линейной зависимости $\sigma_i = \sigma_0 + \Pi \varepsilon_i$ и степенной функции $\sigma_i = K \varepsilon_i^n$.

Найти аппроксимирующую зависимость – это значит выразить коэффициенты σ_0 , Π или K через основные константы механических свойств.

Для нахождения коэффициентов аппроксимирующей зависимости необходимо знать условия ее поведения.

Линейная аппроксимация кривых упрочнения. Линейная аппроксимирующая зависимость должна проходить через точку начала сосредоточенной деформации и удовлетворять свойствам кривых упрочнения.

Из сформулированного условия следует, что аппроксимирующая прямая есть касательная к кривой упрочнения в точке начала сосредоточенной деформации. С учетом свойств кривых упрочнения первого вида коэффициенты аппроксимации составляют: $\sigma_0 = \sigma_B$, $\Pi = \sigma_B$.

Тогда выбранная линейная аппроксимирующая функция будет иметь вид

$$\sigma_i = \sigma_B + \sigma_B \delta_i = \sigma_B (1 + \delta_i) \quad (1)$$

Если же линейной функцией аппроксимировать кривую упрочнения второго вида $\sigma_i = f(\psi_i)$, то используя свойства кривых упрочнения второго вида, получим:

$$\sigma_0 = \frac{\sigma_B (1 - 2\psi_p)}{(1 - \psi_p)^2}; \quad \Pi = \frac{\sigma_B}{(1 - \psi_p)^2}$$

и линейная аппроксимирующая зависимость будет иметь вид

$$\sigma_i = \frac{\sigma_B (1 - 2\psi_p)}{(1 - \psi_p)^2} + \frac{\sigma_i \psi_i}{(1 - \psi_p)^2}$$

или

(2)

$$\sigma_i = \frac{\sigma_B}{(1 - \psi_p)^2} (1 - 2\psi_p + \psi_i).$$

Аппроксимация кривых упрочнения степенной функцией. Степенная функция должна проходить через точку начала сосредоточенной деформации, а касательная к ней должна удовлетворять свойствам кривой упрочнения. Другими словами граничным условием $\sigma_i = f(\varepsilon_i)$ является ее значение в точке R_{max} .

Рассмотрим кривую упрочнения второго вида. Подставляя в уравнение $\sigma_i = K \psi_i^n$ координаты точки начала сосредоточенной деформации S_B , ψ_p , получим выражения для определения коэффициента K :

$$S_B = K \psi_p^n; \quad K = \frac{S_B}{\psi_p^n}.$$

После замены коэффициента K (его найденным значением) степенная функция принимает вид

$$\sigma_i = \frac{S_B}{\psi_p^n} \psi_i^n \quad (3)$$

Умножив обе части последнего равенства на текущую площадь F_i , получим выражение, описывающее изменение усилия P_i от степени деформации образца:

$$P_i = \sigma_i F_i = F_i \frac{S_B}{\psi_p^n} \psi_i^n \quad (4)$$

для которого в точке начала сосредоточенного сужения справедливо условие

$$dP_i^{\max} = 0.$$

Заменяя $F_i = F_0(1-\psi_i)$, дифференцируя выражение (4) и приравнявая dP_i в точке, соответствующей $\psi_p = 0$, найдем формулу для определения коэффициента n :

$$n = \frac{\psi_p}{1-\psi_p} \quad (5).$$

Аналогично определяются коэффициенты степенной аппроксимации $\sigma_i = K\delta_i^n$ кривой упрочнения первого вида:

$$K = \frac{S_B}{\delta_p^n}; \quad n = \frac{\delta_p}{1+\delta_p}.$$

Степенная аппроксимация кривой упрочнения первого вида выразится следующей формулой

$$\sigma_i = \frac{S_B}{\delta_p^n} \delta_i^n = S_B \left(\frac{\delta_i}{\delta_p} \right)^{\frac{\delta_p}{1+\delta_p}}.$$

На практике довольно часто используется другое условие проведения степенной аппроксимации, когда аппроксимирующая функция имеет две общие точки с экспериментальной кривой.

Обычно это точки, соответствующие:

- моменту образования шейки (напряжение S_B и деформация δ_p);
- началу пластической деформации (напряжение предела текучести S_s или $S_{0,2}$ и деформация δ_s или $\delta_{0,2}$).

Граничные условия для этих точек имеют вид:

$$S_B = K\delta_p^n; \quad S_{s(0,2)} = K\delta_{s(0,2)}^n \quad (6).$$

Решим систему уравнений с неизвестными K и n получим:

$$n = \frac{\ln S_B - \ln S_{s(0,2)}}{\ln \delta_p - \ln \delta_{s(0,2)}} \quad (7)$$

где $S_B = \sigma_B(1 + \delta_p), \quad S_{s(0,2)} \approx \sigma_{s(0,2)}$

$$\delta_s = \frac{\sigma_s}{E} \quad \text{или} \quad \delta_{0,2} = 0,002.$$

Таким образом, зная константы механических свойств, по приведенным формулам можно найти коэффициенты аппроксимирующих зависимостей.

4. СРАВНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ КРИВЫХ И АППРОКСИМИРУЮЩИХ ЗАВИСИМОСТЕЙ

Полученные экспериментальные кривые сравниваются с аппроксимирующими их аналитическими зависимостями.

Для кривой упрочнения первого вида используются:

- линейная аппроксимация типа $\sigma_i = \sigma_0 + \Pi\delta_i$;
- степенная аппроксимация $\sigma_i - K\delta_i^n$ с использованием только одного граничного условия в точке P_{\max} ;
- $\sigma_i - K\delta_i^n$ с использованием двух граничных условий в точках P_{\max} и $P_{s(0,2)}$.

Для кривой упрочнения второго вида применяется:

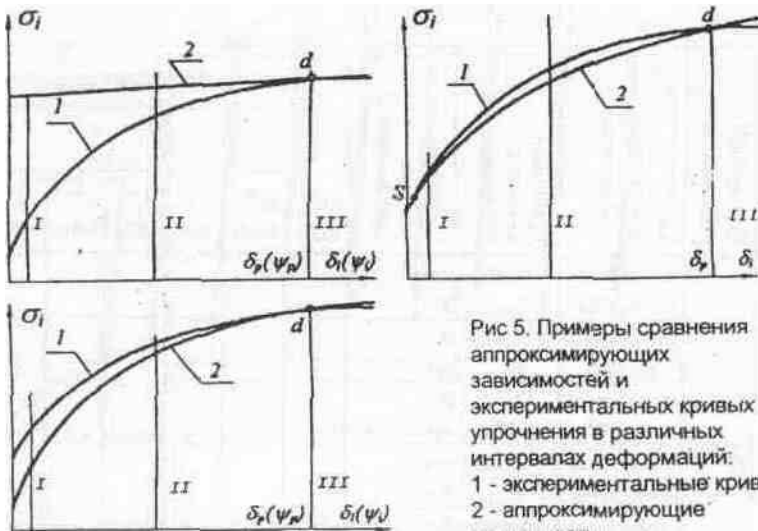
- линейная аппроксимация $\sigma_i = \sigma_0 + \Pi\psi_i$;
- степенная аппроксимация $\sigma_i - K\psi_i$ с использованием одного граничного условия.

Так как при различных деформациях разница в величине значений напряжений на аппроксимирующей и экспериментальной кривых так же различна, то оценку погрешности проводят в трех интервалах деформаций

$\varepsilon_1 \approx 3 - 3,5$, $\varepsilon_n = \delta_p/2$; $\varepsilon_m = \delta_p$ (рис. 5).

Величину относительной погрешности вычисляют по формуле:

$$\Delta = \left| \frac{\sigma_i^{\text{ап}} - \sigma_i^{\text{эк}}}{\sigma_i^{\text{ап}}} \right| \cdot 100\% .$$



ПОРЯДОК ОФОРМЛЕНИЯ ДОМАШНЕГО ЗАДАНИЯ

Домашнее задание оформляется в виде графической части и пояснительной записки к ней.

Содержание графической части

1. Кривые упрочнения 1-го и 2-го рода, позволяющие оценить правильность применения приемов их построения.
2. Графическая проверка правильности построения кривой упрочнения. Графическая часть выполняется карандашом на листе масштабной координатной бумаги формата А4.

Возможно наложение аппроксимирующих кривых на один график экспериментальных кривых I и II вида, если это не затруднит их чтение и понимание.

Содержание пояснительной записки

В пояснительной записке проводятся все расчеты и выводы по заданию.

Основные моменты расчетной части сводятся в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Сплав	Основные механические свойства					
	$\sigma_{S(0,2)}$ МПа	σ_B МПа	S_B МПа	δ_p %	ψ_p %	$\delta_{5(10)}$ %

Таблица 2

Вид кривой упрочне-	Тип аппроксимации и ее формула	Граничные условия в	Численные значения коэффициентов	Интервал деформаций									
				I			II			III			
				$\varepsilon_I = \dots$			$\varepsilon_{II} = \dots$			$\varepsilon_{III} = \dots$			
				$\sigma_i^{эк}$	σ_i^a	Δ	$\sigma_i^{эк}$	σ_i^a	Δ	$\sigma_i^{эк}$	σ_i^a	Δ	
, М Па	, М Па	, %	, М Па	, М Па	, %	, М Па	, М Па	, %					
I	линейная $\sigma_i = \sigma_0 + \dots + \Pi \delta_i^n$	точка а R_m ах	$\sigma_0 = \dots$ $\Pi = \dots$										
	степенная $\sigma_i = K \delta_i$	точка а R_m ах	$K = \dots$ $n = \dots$										
	степенная $\sigma_i = K \delta_i$	точка и R_m ах, $R_s(0,2)$	$K = \dots$ $n = \dots$										
II	линейная $\sigma_i = \sigma_0 + \dots + \Pi \psi_i^n$	точка а R_m ах	$\sigma_0 = \dots$ $\Pi = \dots$										
	степенная $\sigma_i = K$	точка а R_m	$K = \dots$ $n = \dots$										

	Ψ_i^n	ax	...											
--	------------	----	-----	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Золотаревский В.С. Механические свойства металлов. Учебник для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: "МИСИС". 1998. – 400 с.
2. Упрочнение металлов при статическом растяжении. Метод. указания к дом. заданию (Самар. Гос. аэрокосмич. Ун-т. сост. В.В. Уваров. Самара, 1993, с. 16).