УДК 539.4. 014
А.А.Лебедев, В.П.Ламашевский
Институт проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины

ВЛИЯНИЕ ВИДА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ НА ДЕФОРМИРОВАНИЕ И ПРОЧНОСТЬ ТЕПЛОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ

В процессе эксплуатации изделий, работающих при повышенных и высоких температурах, за счет локальных перегревов, а также в местах концентрации напряжений материал может подвергаться нагружению за пределом упругости. В связи с этим для обеспечения высокой надежности конструкций необходимо создание научно-обоснованных методов расчета напряженно-деформированного состояния несущих элементов с учетом неупругих деформаций. Известно, что любой расчет, связанный с оценкой несущей способности, требует определенной исходной информации об используемых материалах. При решении краевых задач, в том числе и с использованием численных методов, такой информацией являются уравнения состояния, описывающие связь между компонентами тензоров напряжений и деформаций. Основой для построения этих уравнений служат экспериментально устанавливаемые законы упрочнения и условия предельного состояния (критерии прочности).

Интенсивные исследования, проводимые в этом направлении в последнее время, позволили сформулировать ряд гипотез, на которых базируются современные теории пластичности и прочности. Однако возможности использования этих теорий применительно к оценке несущей способности конструктивных элементов агрегатов, работающих в экстремальных условиях, в частности при высоких температурах, исследованы недостаточно.

Настоящее экспериментальное исследование проведено с целью изучения влияния вида напряженного состояния и высоких температур на сопротивление пластическому деформированию и разрушению двух теплостойких материалов - хромомолибденалюминиевой стали феррито-перлитного класса 38Х2МЮА и стали аустенитного класса 20Х25Н20С2 (ЭИ283), прошедших штатную для этих материалов термообработку в заготовках.

Процесс кратковременного деформирования и разрушения металлов исследовали при испытаниях пятикратных гладких цилиндрических (рис.1,а) в условиях одноосного растяжения и тонкостенных трубчатых образцов (рис.1б) при плоском напряженном состоянии.

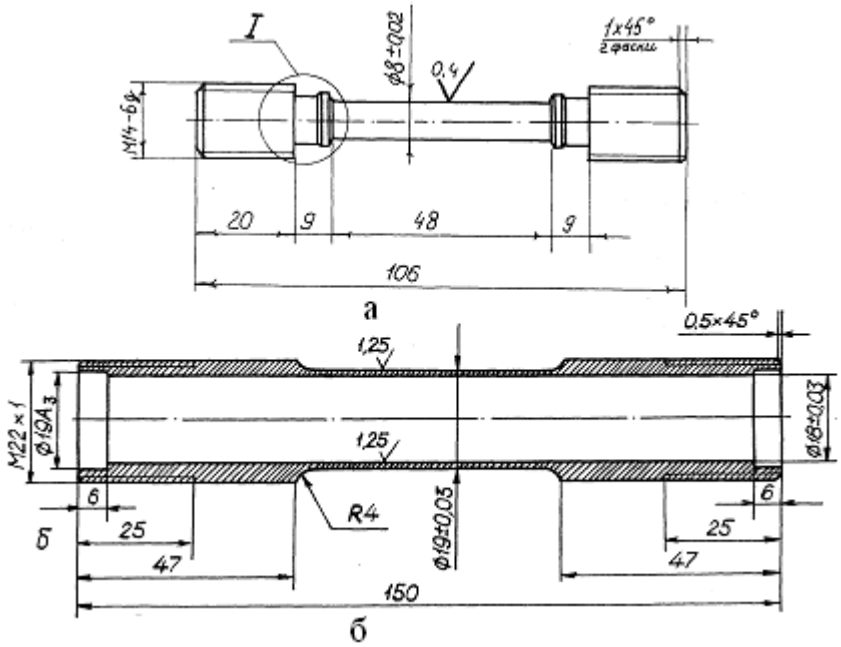


Рис. 1 Образцы для испытаний: а - сплошной для испытаний на одноосное растяжение; б - тонкостенный трубчатый для испытаний при плоском напряженном состоянии.

Плоское напряженное состояние создавалось путем одновременного нагружения трубчатых образцов осевой (растягивающей или сжимающей) силой и внутренним давлением с реализацией в пространстве главных напряжений лучевых траекторий с соотношениями

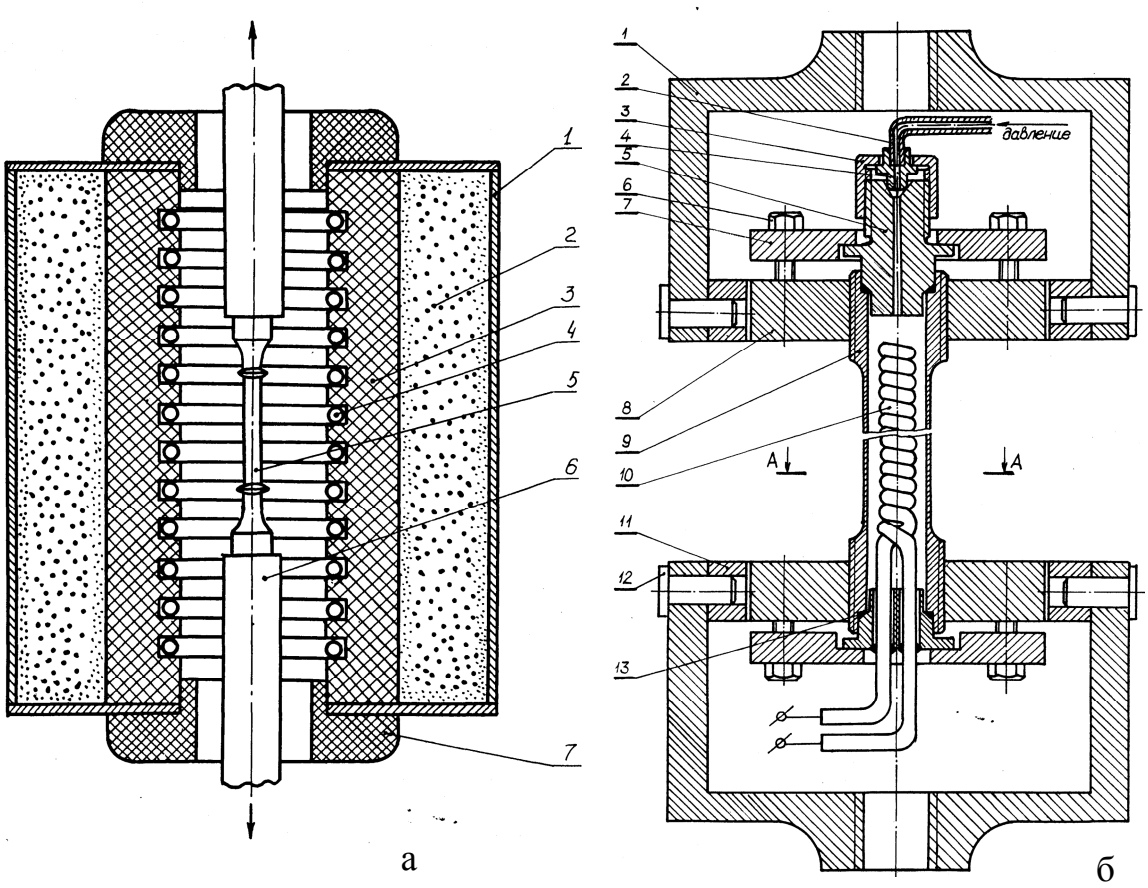
©А.А.Лебедев, В.П.Ламашевский

продольного и окружного нормальных напряжений - $K=\sigma_z / \sigma_\Theta = \infty$, 2, 1, 0,5, 0, -1, $-\infty$. Испытания проводили на установках, разработанных в Институте проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины.

В качестве рабочей среды для создания внутреннего давления в трубчатом образце при температурах до 873К использовали индустриальное масло, более высокой температуре – газообразный азот.

Нагрев сплошных цилиндрических образцов производился в электропечи сопротивления (рис.2,а), а трубчатых образцов - с помощью специального нагревателя, изготовленного из кабеля КНМСНХ 1х0,502 (рис.2,б.), помещенного во внутреннюю полость трубчатого образца. Температуру при нагреве контролировали хромель-алюмелевыми термопарами, приваренными к рабочей части образца и автоматически поддерживали на заданном уровне высокоточным регулятором температуры ВРТ-3.

Осевую и тангенциальную деформации образцов измеряли электромеханическим тензометром, содержащим охлаждаемые проточной водой упругие тензометрические элементы. База измерений осевых деформаций составляла 20 мм. Радиальную деформацию ε_r рассчитывали из условия несжимаемости материала при пластическом деформировании (с учетом упругого изменения объема):при



а б

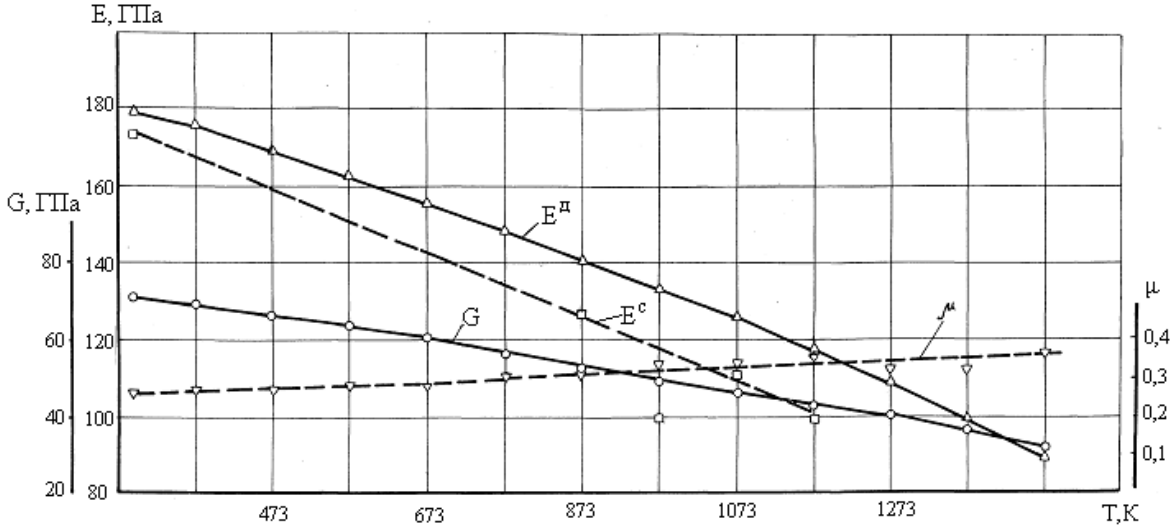
Рис 2. Системы нагрева образцов для испытаний: а – при одноосном растяжении: 1-металлический кожух печи; 2-теплоизоляция; 3- керамическая обечайка; 4-нагревательная спираль; 5-образец; 6-захват; 7-керамическая крышка; б-при плоском напряженном состоянии: 1-захват; 2-трубопровод давления; 3- накидная гайка; 4,5-штуцер; 6-болты; 7,8-пластины; 9-образец 10- нагреватель; 12- пальцы; 13-медная прокладка.

$$\varepsilon_r = (1-2\mu_z)\sigma_z / E_z + (1-2\mu_\Theta)\, \sigma_\Theta / E_\Theta - \varepsilon_z - \varepsilon_\Theta,$$

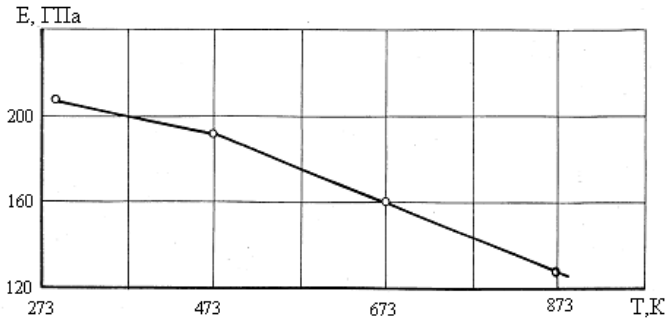
где ε_z, ε_Θ – осевая и тангенциальная деформации; σ_z, σ_Θ – условные осевое и тангенциальное напряжения, соответственно; E_z, E_Θ, μ_z, μ_Θ – модули упругости экспериментально определялись в исследуемом температурном диапазоне.

©А.А.Лебедев, В.П.Ламашевский

На рис.3,а приведены температурные зависимости упругих постоянных исследуемых материалов, полученные динамическим методом путем измерения резонансных частот поперечных и продольных колебаний цилиндрических образцов. Значения модулей E и G для материала брались по усредненному значению измерений трех образцов. Как и следовало ожидать, повышение температуры испытаний приводит к практически монотонному снижению значений упругих постоянных. На рисунке 3,а показана зависимость модуля Юнга стали 20Х25Н20С2 от температуры, который определялся путем обработки начальных участков кривых растяжения при статических испытаниях. Отметим, что практически нет различия в характере температурных зависимостях модулей упругости $E^{с.}$ и $E^{д.}$, хотя значения статического модуля упругости лежат несколько ниже во всем температурном диапазоне. Максимальное различие имеет место при температурах порядка 1173К и составляет порядка 1,5 %. На рис.3,б, для примера, приведена зависимость статического модуля упругости от температуры для феррито-перлитной стали 38Х2МЮА.и коэффициенты Пуассона в осевом и тангенциальном направлениях, которые



а

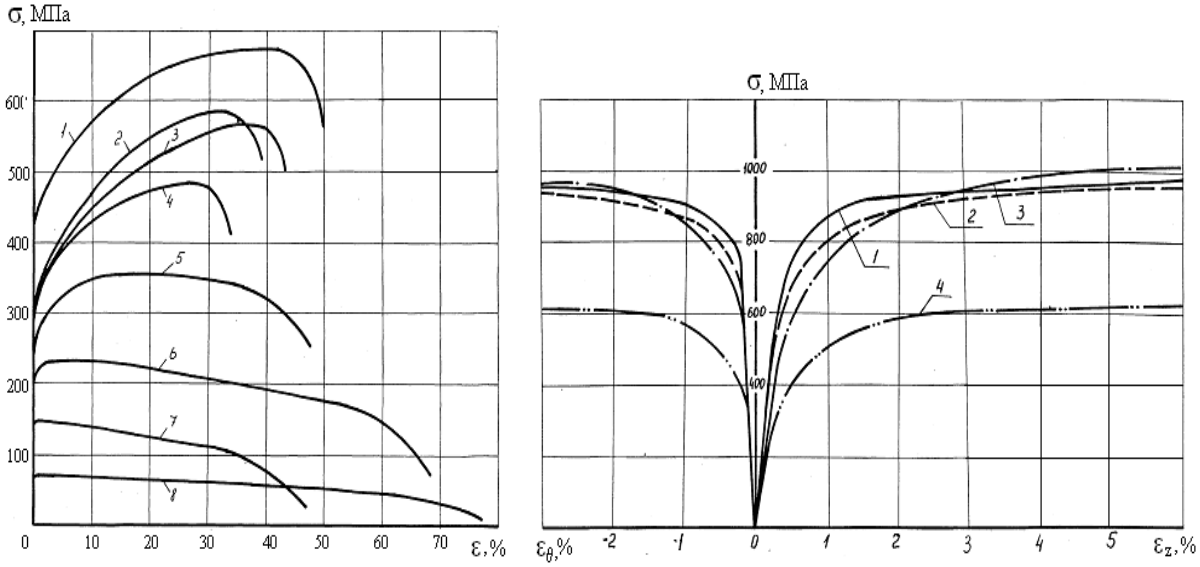


б

Рис.3 Температурные зависимости упругих постоянных сталей Х25Н20С2 (а) и 38Х2МЮА (б)

Исходную информацию о поведении материалов при высоких темпера-турах получали, обрабатывая кривые растяжения сплошных цилиндрических образцов в координатах «N-Δl». В дальнейшем эти кривые перестраивались в диаграммы деформирования металлов в координатах «σ-ε». На рис.4 показаны эти диаграммы при различных температурах, а в таблицах 1 и 2 даны значения характеристик механических свойств этих материалов при различных температурах, полученные при обработке результатов испытаний 3-4 образцов.

©А.А.Лебедев, В.П.Ламашевский



а б

Рис.4 Кривые упрочнения стали 20Х25Н20С2 при различных температурах (а): 1- 293 К; 2- 473 К; 3- 673 К; 4- 873 К; 5- 973 К; 6- 1073 К; 7- 1173 К; 8- 1273 К и кривые деформирования стали 38Х2МЮА (б) при различных температурах: 1- 293 К; 2- 473 К; 3- 673 К; 4- 873 К.

Таблица 1.

Характеристики механических свойств феррито-перлитной стали 38Х2МЮА при различных температурах.

№ п/п	Т, К	$Ex10^{-5}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B, МПа	$\varepsilon_к$, %
1	293	2,23	800	1016	34,90
2	473	1,90	685	1003	22,00
3	673	1,59	640	1087	17,80
4	873	1,33	440	628	21,10

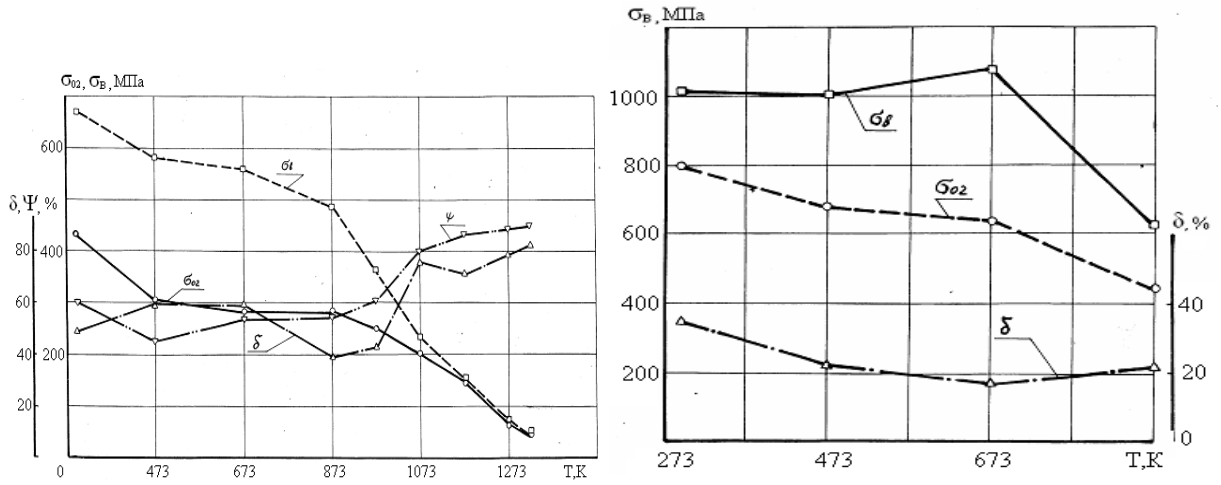
Таблица 2.

Характеристики механических свойств жаропрочной стали 20Х25Р20С2 (ЭИ-283) при различных температурах

Температу-ра испыта-ний, К	Характеристики механических свойств						
	$E \times 10^{-5}$, МПа	$Gx10^{-5}$, МПА	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B, МПа	δ_5,%	Ψ,%	μ
293	1,79	0,71	427,0	682,6	51,80	60,90	0,264
473	1,69	0,66	306,0	582,0	49,40	45,00	0,271
673	1,55	0,61	286,0	570,0	48,40	53,00	0,279
873	1,39	0,53	290,0	490,0	40,00	54,00	0,316
973	1,33	0,50	268,0	350,0	43,00	60,00	0,343
1073	1,26	0,47	204,0	234,0	74,20	81,40	0,345
1173	1,17	0,43	146,0	151,0	70,00	86,00	0,360
1273	1,09	0,41	65,0	70,0	79,00	88,00	0,324
1373	0,99	0,37	48,0	48,5	82,00	90,90	0,320

©А.А.Лебедев, В.П.Ламашевский

Графическая интерпретация температурных зависимостей характеристик механических свойств испытываемых материалов показана на рис.5.



а б

Рис.5. Зависимость характеристик прочности и пластичности стали 20Х25Н20С2 (а) и стали 38Х2МЮА (б) от температуры.

Из приведенных экспериментальных данных следует, что для обоих материалов с повышением температуры испытаний имеет место снижение характеристик прочности и рост характеристик пластичности. При чем на температурных зависимостях характеристик механических свойств можно выделить ряд характерных участков. Для аустенитной стали до температуры 473К пластические свойства остаются стабильными при некотором снижении сопротивления деформированию и разрушению. В диапазоне температур 473-873К имеет место стабилизация характеристик прочности и пластичности. Нагрев металла до более высоких температур приводит к резкому снижению сопротивления механическому нагружению, значительному сокращению участков деформационного упрочнения. Микроструктурный анализ показывает, что при деформировании металла в области высоких температур (1023К и выше) происходит образование двойников, измельчение зерен, интенсивное выделение по их границам σ-фазы, что в какой-то мере стабилизирует пластические свойства (1073-1323К).

Обращает на себя внимание отсутствие деформационного упрочнения у стали при температурах выше 1173К (фактически в этом случае $\sigma_{02}=\sigma_B$).

При оценке конструкционной прочности металлов существенную роль играет физическое уравнение $\sigma=\psi(\varepsilon)$. Наибольшее распространение в расчетной практике получило уравнение в виде степенной зависимости:

$$\sigma = \sigma_T (\varepsilon / \varepsilon^T)^m,$$

где σ_T - предел текучести; ε^T – деформация на пределе текучести; $m= d\sigma/d\varepsilon$- показатель деформационного упрочнения. На рис.6 приведена температурная зависимость коэффициента упрочнения стали 20Х25Н20С2, из которой видно, что на начальном этапе повышения температуры испытаний (до 473К) этот коэффициент увеличивается. Дальнейшее повышение температуры приводит к снижению его величины, особенно в диапазоне температур 673-873К. После 1023К участок деформационного упрочнения резко сокращается, а незначительное повышение температуры приводит к деформационному разупрочнению.

©А.А.Лебедев, В.П.Ламашевский

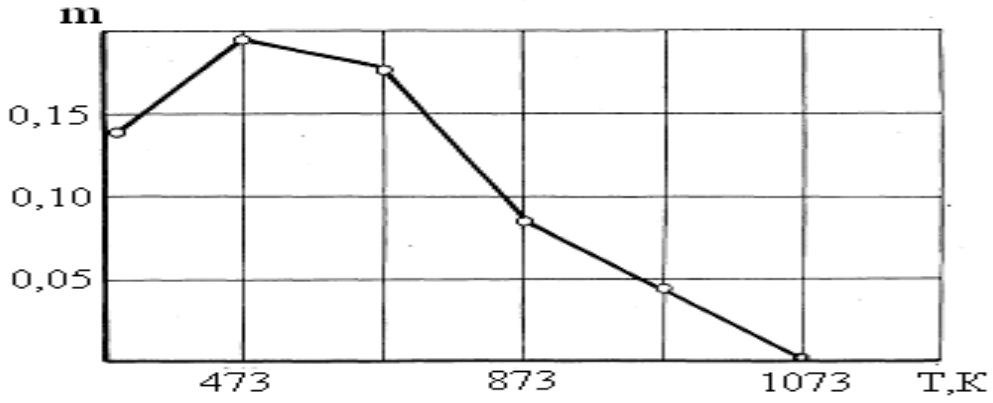


Рис.6 Влияние температуры на упрочнение стали 20Х25Н20С2 при деформировании.

Как известно, при сложном напряженном состоянии процесс деформирования при высоких температурах значительно усложняется. Это, в первую очередь, связано с метастабильностью материалов и влиянием на нее видом напряженного состояния. Ниже представлены результаты экспериментального исследования закономерностей деформирования и разрушения исследуемых металлов в условиях плоского напряженного состояния при различных уровнях высоких температур.

На рис.7 приведены кривые деформирования стали 20Х25Н20С2 при четырех уровнях температур и различных соотношениях главных напряжений.

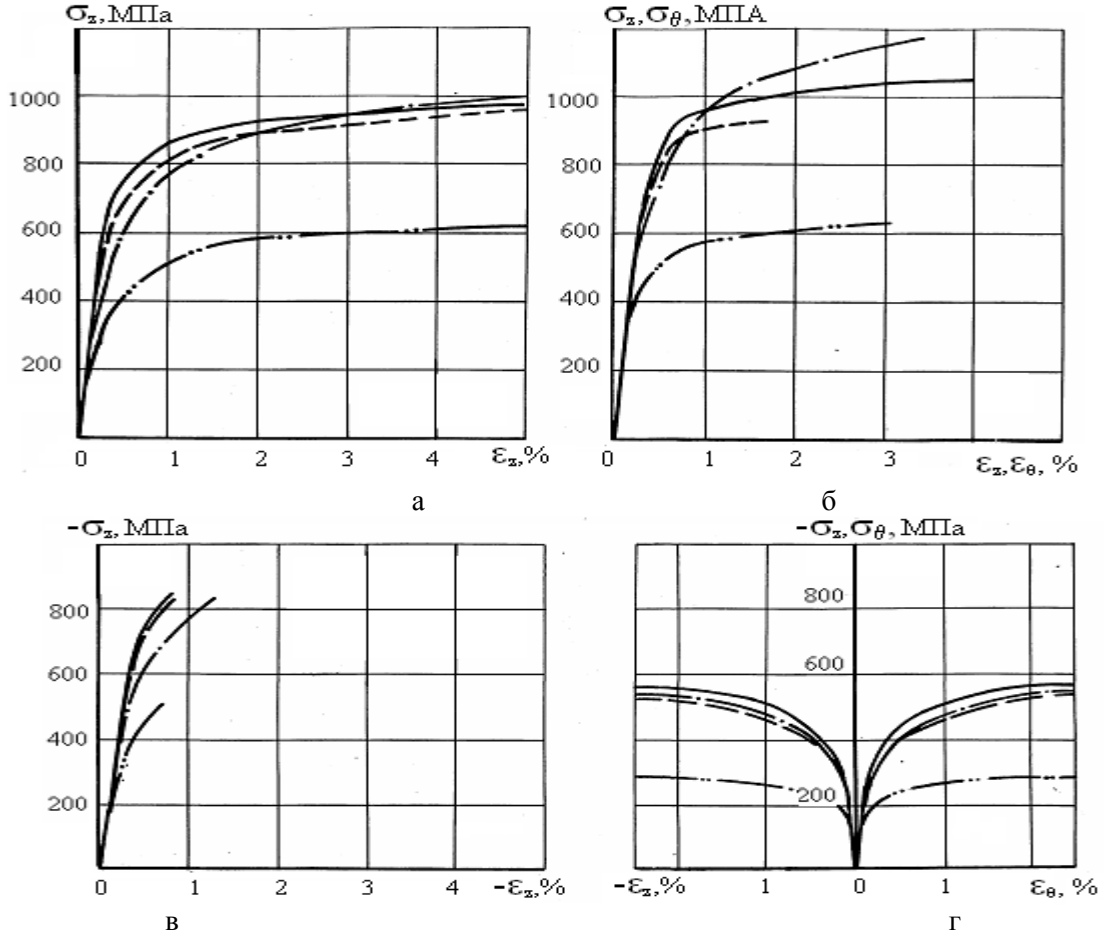


Рис.7. Кривые деформирования стали 20Х25Н20С2: а- К=σ_z / σ_Θ = ∞; б- К=1; в- К= -∞; К= -1; сплошная линия – Т=873 К; штриховая линия – Т=973 К; штрих-пунктирная линия – Т=1073 К; штрих-двопунктирная линия –Т =1173 К.

©А.А.Лебедев, В.П.Ламашевский

В таблице 3 приведены величины характеристик механических свойств исследуемой стали при четырех уровнях температур и различных соотношениях главных напряжений.

Деформационная способность и прочность металла, как видно из приведенных данных, существенно зависит как от температуры, так и от вида напряженного состояния. Анализируя эти результаты, следует отметить, что наложение второй компоненты напряжений неоднозначно влияет на поведение металла под нагрузкой. Повышение температуры испытаний до 873К способствует повышению сопротивления деформированию в условиях равномерного двухосного растяжения, а дальнейший рост температуры приводит к его снижению.

Таблица 3.

Характеристики прочности стали 20Х25Р20С2 (ЭИ-283) при высоких температурах в условиях плоского напряженного состояния

Т, К	$K=\sigma_z/\sigma_\Theta$	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B, МПа
	∞	235,0	447,5
	1,0	260,0	340,0
873	0,5	260,0	311,4
	-1,0	160,0	-
	∞	235,0	340,0
	1,0	190,0	287,0
973	0,5	190,0	282,0
	-1,0	112,0	-
	∞	150,0	230,0
	0,5	145,0	228,0
1073	1,0	145,0	228,0
	-1,0	95,0	-
	∞	95,0	110,0
	0,5	70,0	101,4
1173	1,0	78,0	132,0
	-1,0	52,0	-

Такое поведение материала обуславливается, очевидно, его природой. Известно, что для повышения жаростойкости сплава в его состав вводят до 2,5% кремния, который при нагреве металла способствует выделению в его структуре твердой σ-фазы, тормозящей процесс пластического деформирования. Эта фаза в зависимости от уровня температуры и приложенных нагрузок может выпадать как по границам зерен, что приводит к охрупчиванию материала, снижению его сопротивления разрушению, так и в теле зерна, что, в свою очередь, способствует упрочнению материала, повышению сопротивления деформированию.

В таблице 4 и на рис.8 приведены температурные зависимости характеристик прочности в оценке $\sigma_{0,2}$, σ_B и пластичности в оценке $\varepsilon_z^к$ %, $\varepsilon_\Theta^к$ % и δ% стали 38ХМЮА.

Таблица.4

Механические характеристики стали 38ХМЮА при сложном напряженном состоянии

Т, К	$K=\sigma_z/\sigma_\Theta$	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B, МПа	$\varepsilon_z^к$ %	$\varepsilon_\Theta^к$ %	Примеч.
	∞	800,0	1016,0	34,90	-15,30	
	1,0	888,0	1052,0	4,00	2,30	
293	0,5	878,0	988,0	-	0,38	
	-1,0	420,0	-	-	-	
	∞	685,0	1003,0	20,00	-10,89	
	1,0	900,0	920,0	0,44	1,39	
473	0,5	950,0	1015,0	0,08	0,47	
	-1,0	400,0	-	-	-	
	∞	640,0	1087,0	17,80	8,05	
	0,5	950,0	1172,0	3,40	3,00	
673	1,0	760,0	1157,0	-	-	
	-1,0	450,0	-	-	-	
	∞	440,0	604,0	21,10	11,80	
873	0,5	476,0	628,0	2,53	2,97	
	1,0	400,0	480,0	0,10	1,30	«свищ» в образце
	-1,0	230,0	-	-	-	

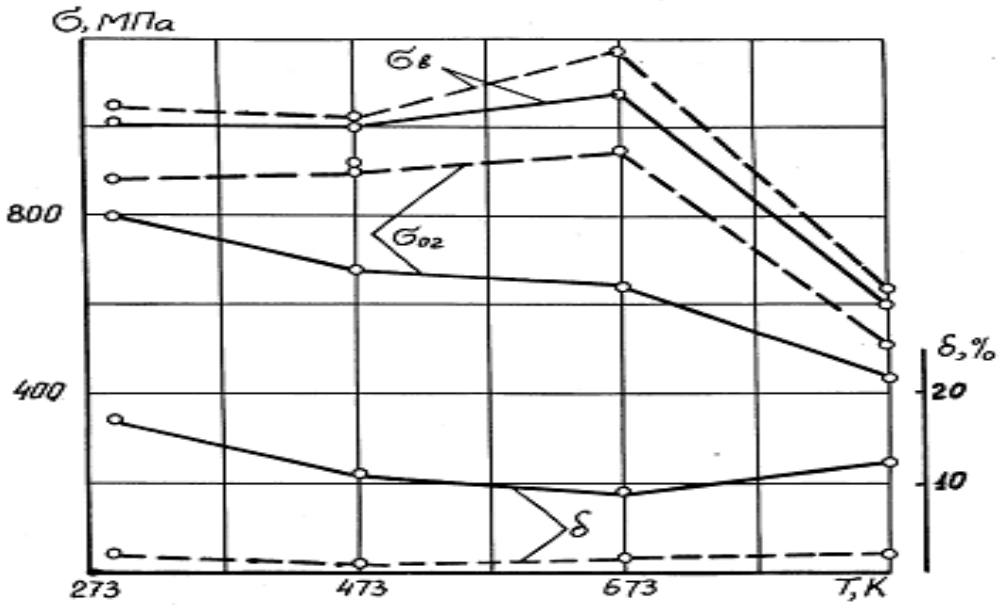


Рис.8 Температурные зависимости характеристик прочности и пластичности стали 38Х2МЮА для одноосного и двухосного растяжения: сплошная линия - одноосное растяжение; штриховая – двухосное растяжение.

Из приведенных результатов видно, что сопротивление деформированию феррито-перлитной стали, в температурном диапазоне 293-673К при всех видах напряженного состояния, слабо зависит от температуры. Дальнейшее повышение температуры испытаний сопротивление деформирования уменьшается, за исключением двухосного равномерного растяжения. При температуре 873К происходит резкое снижение сопротивления деформиро-ванию и разрушению как при одноосном, так и при двуосном растяжении.

Обобщенные кривые деформирования, построенные для различных соотношений главных напряжений, приведены на рис.9

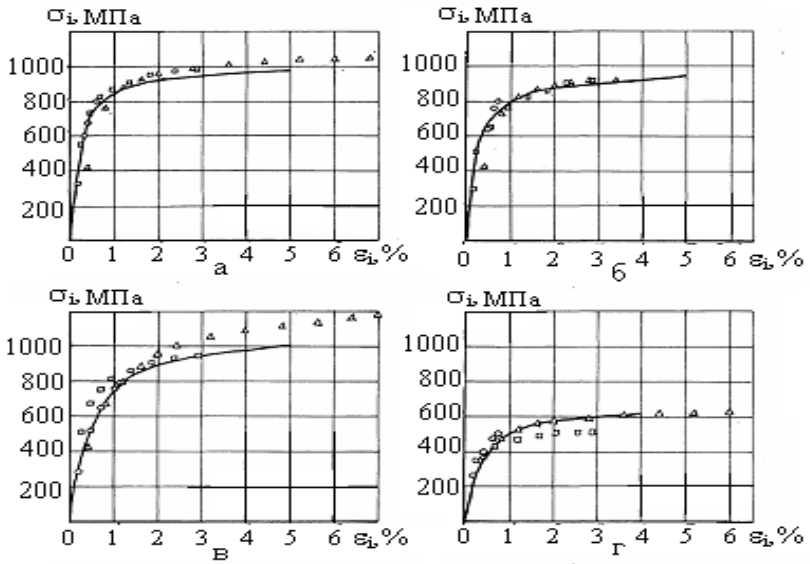


Рис.9 Обобщенные кривые деформирования стали 38Х2МЮА при разных температурах: а- Т=293К; б - Т=473К; в- Т=673К, г- Т=873К.

Как следует из рисунка, в первом приближении, кривую упрочнения этой стали при повышенных температурах можно записать в виде $\sigma_i = \varphi(\varepsilon_i)$.

Для расчета эквивалентных напряжений в условиях сложного напряженного состояния используют инвариантные к действующей системе напряжений функции вида $F(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$. На рис.10 проведено сопоставление экспериментальных результатов с известными критериями предельных состояний. Сравнение экспериментальных данных с расчетными значениями по условиям Мизеса и Кулона показывает, что для исследуемых металлов в интервале рабочих температур с повышением температуры экспериментальные точки в области двухосного растяжения отклоняются от значений, соответствующих классическим критериям предельного состояния, что необходимо учитывать в проектируемых изделиях.

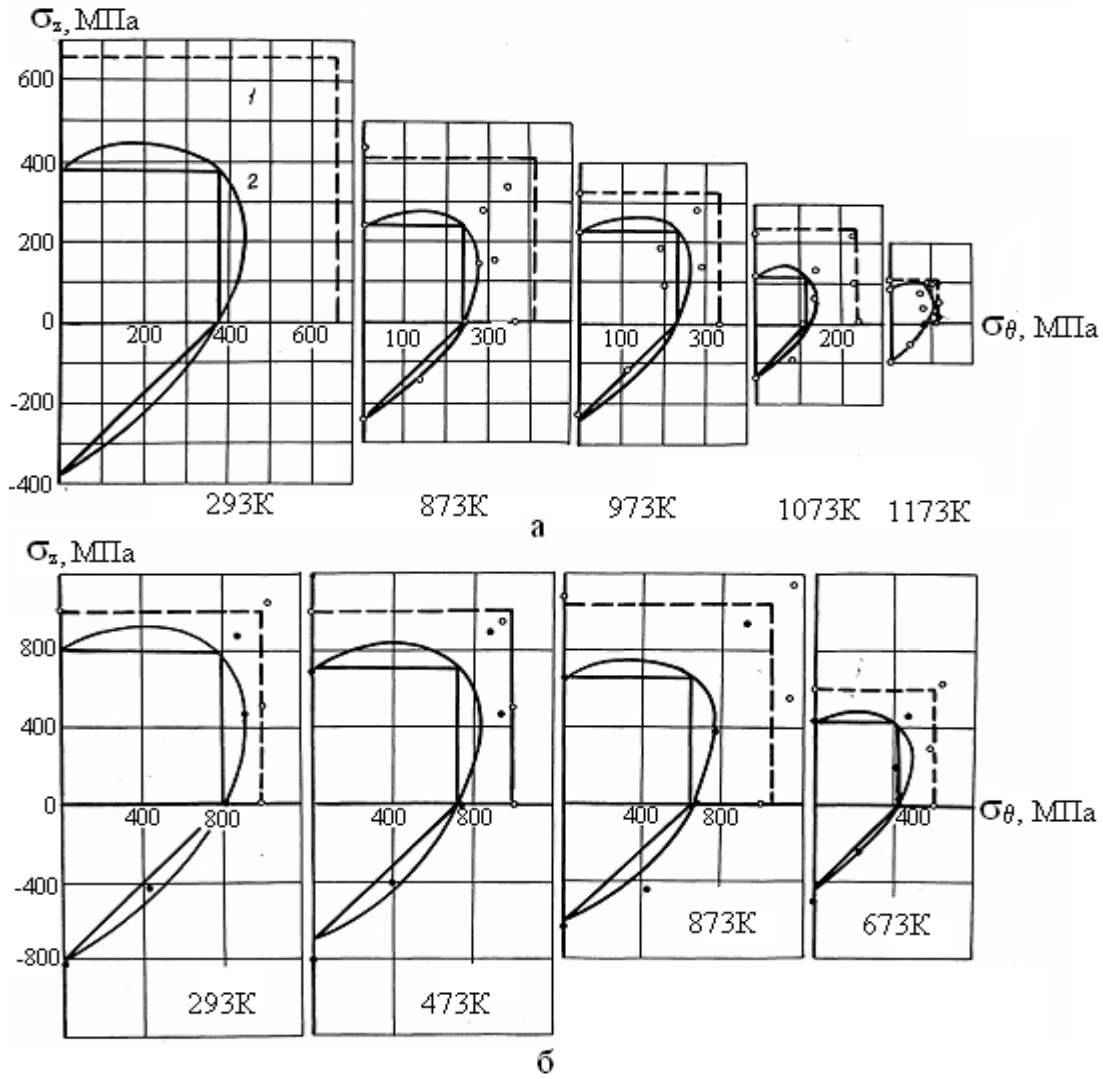


Рис.10 Предельные кривые текучести и разрушения исследуемых материалов при различных температурах: а- сталь 20Х25Р20С2; б- сталь 38Х2МЮА, сплошные линии – предельное состояние текучести; штриховые линии – предельное состояние разрушения; 1 – $\sigma_{пр.} <$ или $= \sigma_{max}$; 2- $\sigma_{пр.} <$ или $= \sigma_i = (\sigma_z^2 - \sigma_z \sigma_\Theta + \sigma_\Theta)^{1/2}$

©А.А.Лебедев, В.П.Ламашевский