

① М163763
Министерство высшего и среднего специального образования СССР

Московское
ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище имени Н. Э. Баумана

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

Инж. В. П. ТИБАНОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ ВАЛОВ И ОСЕЙ
ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ
(161—Машиноведение и детали машин)

Диссертация написана на русском языке

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в Московском высшем техническом училище им. Н. Э. Баумана.

Научный руководитель —

заслуженный деятель науки и техники РСФСР, доктор технических наук, профессор Решетов Д. Н.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор БЫКОВ В. А.

кандидат технических наук, старший научный сотрудник Кошелев П. Ф.

Ведущее предприятие — Всесоюзный научно-исследовательский тепловозный институт (ВНИТИ).

Автореферат разослан « »

1972 г.

Защита диссертации
на заседании Совета
диссертаций МВТУ им. Н. Э.
Баумана, 2-я Бауманская ул., д. 15

Ваши отзывы на
диссертацию прошу
напечатать, просить
подписать и поставить
печатающую машинку

С диссертацией
мне ознакомился
имени Н. Э. Баумана

Ученый секретарь

к. т. н., доцент

М 163763

В в е д е н и е

В связи с ускоренным развитием производительных сил северной и северо-восточной частей СССР, где большую часть года держится низкая температура, значительно расширяется контингент и количество машин и конструкций, вынужденных работать в условиях низких температур. В зимнее время в этих районах частота выхода из строя машин, работающих на открытом воздухе, по причинам различных поломок значительно выше, чем в летние месяцы. Поэтому вопросы эксплуатационной надежности машин и сооружений в условиях низких температур в настоящее время являются актуальными. В "Директивах XXIV съезда КПСС по пятилетнему плану развития народного хозяйства СССР на 1971-1975 годы" перед машиностроителями поставлена задача "обеспечить создание и расширение производства различных видов техники, приспособленной для работы в условиях Крайнего Севера". Проблема создания машин северного исполнения требует решения ряда организационных, экономических, технических и научных задач и связана, в первую очередь, с проведением широких исследований вопросов прочности и надежности деталей машин и элементов конструкций при низких температурах.

Данная работа по исследованию изгибной прочности валов и осей при низких температурах (изгибная прочность часто определяет работоспособность валов и осей) является одним из звеньев комплекса исследований, направленных на решение проблемы прочности и надежности деталей машин в условиях низких температур.

Г л а в а I. Усталость и хрупкость металлов при низких температурах. Постановка задачи исследования.

В главе рассмотрены энергетические, статистические и дислокационные теории усталости металлов. Отмечается, что современные теории не дают исчерпывающего объяснения природы усталости. Рассмотрены гипотезы суммирования усталостных повреждений при переменных режимах нагружения и статистический аспект сопротивления усталости, отмечается большой вклад в развитие этих направлений советских ученых С.В.Серенсена, В.В.Болотина, В.П.Когаева и др.

Исследования сопротивления усталости при низких температурах

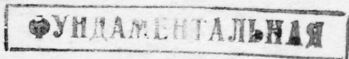
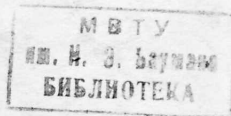
I.

НИБ МИГУ им. Н.Э.Баумана



1163763

Тибанов В.П. Исследование



показывают, что при снижении температуры испытания сопротивление усталости повышается, по крайней мере до -196°C . Отмечается, что большинство усталостных испытаний при низких температурах проведено на образцах малых размеров и в условиях постоянной амплитуды напряжений. Циклические нагрузки выше предела выносливости вызывают снижение статической прочности и пластичности, что может привести к внезапным хрупким разрушениям при низких температурах.

В главе рассмотрены также гипотезы А.Ф.Иоффе, Н.Н.Давиденкова, Я.Б.Фридмана, Г.И.Погодина-Алексеева, Г.В.Ужика и В.С.Ивановой, объясняющие механизм перехода материала деталей машин из вязкого состояния в хрупкое. Указывается, что в условиях низких температур наибольшую опасность при кратковременных однократных нагрузках представляют хрупкие разрушения. Обсуждено влияние термообработки, концентрации напряжений и объемности напряженного состояния, масштабного фактора, скорости приложения нагрузки и усталостных повреждений на склонность металлов к хрупкости. Отмечается, что существующими методами можно оценить склонность к хрупкости лишь деталей определенной формы. Оценка возможности хрупкого разрушения натуральных деталей машин затруднена, а часто практически невозможна.

Приведен краткий обзор результатов обследований хрупких разрушений судов, резервуаров, мостов, и разрушений машин, работающих на открытом воздухе в Магаданской области, Красноярском крае, Якутской АССР и в районе г. Норильска. Отмечается, что с понижением температуры (зимой) существенно увеличивается (в 2 + 5 раз) частота хрупких разрушений по сравнению с летним периодом.

Задачи данного исследования

К исследованию приняты детали типа "вал-ось", являющиеся ответственными деталями машин. Прочность валов и осей машин, эксплуатируемых при низких температурах, необходимо рассматривать в условиях низких температур, т.к. в таких машинах валы и оси (или части их) непосредственно соприкасаются с холодным воздухом.

Проблему прочности валов и осей при низких температурах нельзя считать решенной, т.к. не исследовано сопротивление усталости при низких температурах валов и осей больших диаметров, сопротивление усталости при варьируемых нагрузках, нет надежных критериев склонности к хрупкости валов и осей и т.д.

Задачи исследования сформулированы следующим образом:

1. Исследование усталостной прочности валов и осей на образцах

различных форм и размеров в диапазоне температур от $+20^{\circ}$ до -60°C .

2. Исследование сопротивления усталости валов и осей в условиях низких температур при варьировании нагрузки.

3. Исследование применимости обычных методов расчета на выносливость для валов и осей, работающих при низких температурах.

4. Исследование влияния циклических нагрузжений на статическую прочность валов и осей при низких температурах.

5. Исследование склонности валов и осей к хрупкости.

6. Разработка предложения об оценке сопротивления хрупкому разрушению валов и осей.

Г л а в а II. Экспериментальное исследование усталостной прочности валов и осей при низких температурах.

Приведено обоснование выбора материала и термообработки для образцов. Образцы изготовлялись из сталей марок 45 и 40X; химический состав стали 45 соответствовал ГОСТ 1050-60, стали 40X - ГОСТ 4543-61. Виды термообработки для образцов - нормализация и улучшение. Механические свойства исследованных сталей приведены в табл. I.

Таблица I.

Материал, термообработка	$^{\circ}\text{C}$	σ_{T} , кг/мм^2	σ_{B} , кг/мм^2	ψ , %	a_n , кгм/см^2
Сталь 45, улучшение, 26-28 HRC	+20	75	90	58	10,3
	-30	83	95	57	7,5
	-60	88	98	56	6,1
Сталь 45, нормализация, I76-207 HB	+20	42	64	53	4,8
	-30	45	68	51	3,8
	-60	47	70	49	1,3
Сталь 40X, улучшение, 26-28 HRC	+20	80	92	59	16,3
	-30	85	99	58	14,9
	-60	88	103	55	9,0
Сталь 40X, нормализация, I76-207 HB	+20	47	74	63	5,5
	-30	54	83	62	4,8
	-60	59	88	61	4,1

В табл. I: σ_{T} - предел текучести, σ_{B} - предел прочности, ψ - относительное сужение, a_n - ударная вязкость стандартных образцов.

Для усталостных испытаний применялись круглые образцы: гладкие, надрезанные и со шпоночными пазами. Геометрические характеристики

гладких и надрезанных образцов приведены в табл.2.

Таблица 2.

Тип образца	d, мм	D, мм	ρ , мм	α_σ	$\bar{C}$, I/мм	$\lg L/\bar{C}$
1	5,52	7,52	0,26	2,7	8,062	0,333
2	5,52	7,52	2,0	1,35	1,362	1,105
3	7,52	11	12	1,02	0,482	1,689
4	18	30	18	1,12	0,256	2,345
5	38	60	60	1,06	0,096	3,095

Здесь d – диаметр рабочей части образца; D – диаметр образцов в месте, примыкающем к рабочей части; ρ – радиус дна надреза у образцов с надрезом (тип 1 и 2) или радиус галтели у гладких образцов (тип 3, 4 и 5); α_σ – теоретический коэффициент концентрации напряжений для изгиба по Г.Нейберу; $\bar{C}$ – относительный градиент первого главного напряжения в зоне концентратора и $L/\bar{C}$ – критерий подобия усталостного разрушения С.В.Серенсена и В.П.Когаева.

Образцы со шпоночными канавками изготавливались из гладких образцов ϕ 7,52, 18 и 38 мм. Шпоночные канавки (по одной на образце) фрезеровали пальцевой фрезой; глубина шпоночного паза равнялась $1/6 d$, ширина – $1/3 d$ и длина вдоль оси образца – $2 d$.

Образцы ϕ 7,52 мм испытывались на усталость на серийной машине МУИ-6000 в условиях чистого изгиба с вращением. Испытания на усталость образцов ϕ 18 мм производили на машине 2УКМ-20, спроектированной автором; на ней можно испытывать одновременно 2 образца диаметром до 20 мм в условиях консольного изгиба с вращением при максимальном напряжении 75 кг/мм^2 . Испытания образцов ϕ 38 мм производили на машине УКМ-40, спроектированной автором. Машина УКМ-40 позволяет испытывать на усталость в условиях кругового, консольного изгиба образцы диаметром до 40 мм при напряжении до 75 кг/мм^2 .

Для проведения испытаний при низких температурах к каждой усталостной машине была изготовлена холодильная камера для местного охлаждения образцов парами жидкого азота. Температура внутри камер поддерживалась и регулировалась терморегулятором ЭРА-М. Во время низкотемпературных испытаний температуру образцов периодически контролировали термонарой и микрогальванометром М-95.

Испытания на усталость проводили с постоянной амплитудой напряжений до разрушения при комнатной ($+20^\circ\text{C}$) и низких (-30°C и -60°C)

температурах. При одной температуре испытывали 17-25 образцов одного типа на 5-7 уровнях напряжений. Предел выносливости определяли по ГОСТ 2860-65 и методом "лестницы" на базовом числе циклов нагружений 10^7 . Результаты испытаний обработаны методом математической статистики с использованием методики вычисления корреляционных уравнений при малом числе испытаний. Уравнения кривых усталости получены в виде $\sigma^m \cdot N = \text{const}$, где σ — номинальная амплитуда напряжений, N — число циклов нагружений до разрушения при напряжении σ .

Всего получено 58 кривых усталости. В качестве примера на рис. 1 приведены кривые усталости при $+20^\circ\text{C}$ и -60°C образцов $\phi 38\text{ мм}$.

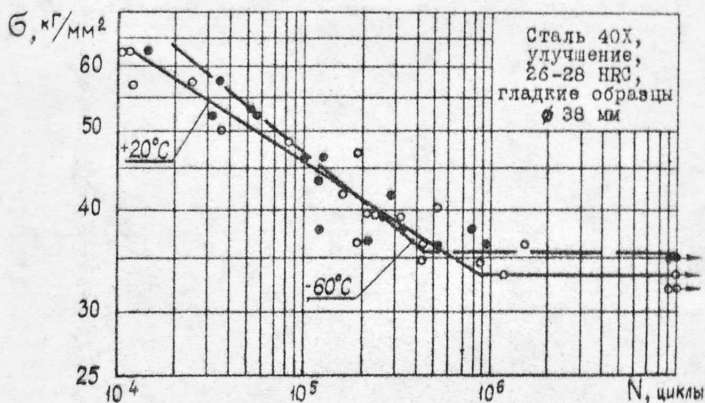


Рис. 1

Кривые усталости, соответствующие вероятности неразрушения 50%

Характеристики сопротивления усталости исследованных типов образцов приведены в табл. 3. Здесь № обозначает тип образцов; № 1-5 — образцы, приведенные в табл. 2; № 6, 7 и 8 — образцы со шпоночными пазами с диаметрами соответственно 7, 52, 18 и 38 мм. Здесь же σ_{-1} — предел выносливости, полученный методом "лестницы", он соответствует вероятности неразрушения 50%; σ_{-1c} — предел выносливости по ГОСТ 2860-65; N_0 — число циклов, соответствующее точке перегиба кривой усталости на уровне σ_{-1} ; m — показатель степени уравнения кривой усталости; K_σ — эффективный коэффициент концентрации напряжений; ε_m — масштабный фактор.

Для описания семейства функций распределения пределов выносливости образцов (деталей) различных форм и размеров С. В. Серенсен и В. П. Когаев предложили следующее уравнение подобия:

Таблица 3.

N ^o n	°C	Б-1 кг/мм ²	Б-1,с кг/мм ² × 10 ⁻⁶	N ₀ X	m	K _б	ε _м	Б-1 кг/мм ²	Б-1,с кг/мм ² × 10 ⁻⁶	N ₀ X	m	K _б	ε _м
Сталь 45, улучшение, 26-28 НРС								Сталь 40X, улучшение, 26-28 НРС					
1	+20	24,9	24,2	1,1	5,39	1,77	-	24,0	23,0	1,1	5,78	1,83	-
	-30	26,8	26,0	1,1	5,35	1,74	-	24,9	24,0	1,6	6,09	1,89	-
	-60	28,4	27,0	1,5	5,71	1,78	-	27,5	27,0	1,2	6,07	1,85	-
2	+20	37,9	36,4	1,0	8,21	1,16	-	38,6	38,2	1,3	8,08	1,14	-
	-30	41,5	39,3	0,74	8,40	1,12	-	41,0	40,0	1,2	8,39	1,15	-
	-60	43,3	42,6	0,95	8,48	1,17	-	43,8	41,4	0,98	8,38	1,16	-
3	+20	44,2	43,2	0,85	8,85	1,0	1,0	44,0	42,8	1,1	9,04	1,0	1,0
	-30	46,5	45,0	1,0	9,23	1,0	1,0	47,1	46,2	1,0	9,30	1,0	1,0
	-60	50,4	49,8	0,76	8,97	1,0	1,0	51,0	49,5	0,96	10,2	1,0	1,0
4	+20	34,8	33,0	0,89	6,57	-	0,79	35,7	34,7	1,5	7,30	-	0,81
	-30	36,3	34,9	1,5	6,65	-	0,78	37,1	36,4	1,6	7,36	-	0,79
	-60	37,9	36,9	1,2	6,22	-	0,75	39,2	38,8	0,84	5,87	-	0,77
5	+20	31,2	28,3	0,9	7,80	-	0,71	33,3	32,0	0,90	6,79	-	0,76
	-60	33,1	31,6	0,36	4,81	-	0,66	35,5	35,0	0,40	5,19	-	0,69
6	+20	31,9	30,8	1,5	4,69	1,38	1,0	31,5	30,0	1,4	5,77	1,40	1,0
	-30	33,6	33,0	1,5	4,80	1,38	1,0	33,2	32,0	1,6	6,14	1,42	1,0
	-60	35,9	34,7	1,0	4,26	1,40	1,0	35,3	34,5	1,4	6,21	1,45	1,0
7	+20	24,4	24,0	2,2	4,79	1,43	0,76	24,7	23,0	1,9	5,07	1,45	0,78
	-30	25,2	24,2	2,1	4,74	1,44	0,75	25,4	24,4	1,7	4,83	1,47	0,76
	-60	26,2	25,3	1,5	3,88	1,45	0,73	26,6	24,2	1,3	4,40	1,47	0,75
8	+20	17,2	16,0	1,5	3,92	1,81	0,54	18,9	17,0	2,3	4,89	1,76	0,60
	-30	17,8	17,0	1,1	3,41	-	0,53	19,4	18,4	1,9	4,83	-	0,59
	-60	18,1	17,0	0,75	3,04	1,83	0,51	19,9	19,0	1,2	4,03	1,79	0,56
Нормализация, 176-207 НВ								Нормализация, 176-207 НВ					
2	+20	25,4	24,8	0,66	7,31	1,21	-	27,2	26,4	0,90	7,41	1,22	-
	-60	27,2	25,5	0,86	6,78	1,27	-	28,7	28,1	0,81	5,82	1,28	-
3	+20	30,8	30,2	0,74	8,03	1,0	1,0	33,2	31,7	1,1	8,96	1,0	1,0
	-60	34,5	34,1	1,1	8,56	1,0	1,0	35,6	35,1	1,1	8,96	1,0	1,0
4	+20	26,0	25,2	1,1	7,78	-	0,84	29,5	27,5	1,6	9,08	-	0,89
	-60	27,1	26,8	2,2	7,60	-	0,81	30,5	29,5	1,7	7,08	-	0,85

$$\lg(\sigma_{\max} - u) = A_L - B \lg \frac{L}{\epsilon} + u_p \cdot S \quad (1)$$

где u , A_L , B — постоянные; S — стандартное отклонение величины $\lg(\sigma_{\max} - u)$; u_p — квантиль нормального распределения; $\bar{\epsilon} = \frac{1}{\sigma_{\max}} \frac{d\epsilon}{dx}$

– относительный градиент первого главного напряжения в зоне концентратора; L – часть периметра опасного сечения (при изгибе круглых образцов $L = \pi d$); $\sigma_{\max}$ – максимальное напряжение в зоне концентратора, определяемое при упругом распределении напряжений.

Приближенные оценки постоянных в уравнении (I) были получены с использованием пределов выносливости σ_{-1} . Эти постоянные α , A_L и B для исследованных сталей приведены в табл.4

Таблица 4.

Материал, термообработка	°C	α , кг/мм ²	A_L	B
Сталь 45, улучшение, 26+28 НС	+20	20,9	1,723	0,205
	-30	20,7	1,778	0,211
	-60	20,5	1,845	0,220
Сталь 40Х, улучшение, 26+28 НС	+20	24,7	1,656	0,204
	-30	22,6	1,714	0,187
	-60	21,2	1,784	0,184

Глава III. Исследование сопротивления усталости при переменных режимах нагружения.

Сопротивление усталости при переменных режимах исследовано при одноступенчатых испытаниях с нагружением по блокам. Испытания проводили при двух режимах изменения амплитуды напряжений, показанных на рис.2, в условиях комнатной и низкой (-60°C) температур. При испытаниях использовали гладкие образцы ϕ 7,52 и 18 мм (тип 3 и 4 в табл.2) из стали марок 45 и 40Х в улучшенном и нормализо-

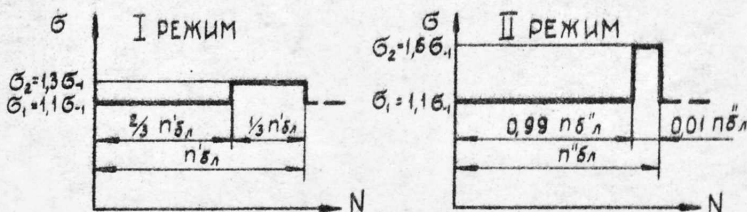


Рис.2

Режимы изменения амплитуды напряжений

ванном состоянии. Образцы испытывались на усталостных машинах МУИ-6000 и 2УКМ-20 до разрушения; при этом число блоков нагружений до разрушения превышало 16.

Накопленное цикловое отношение a вычисляли по формуле

$$a = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} \quad , \quad (2)$$

где n_1 и n_2 – суммарные числа циклов нагружений до разрушения на ступенях напряжений блока нагрузок σ_1 и σ_2 ; N_1 и N_2 – числа циклов до разрушения при напряжениях σ_1 и σ_2 . Полученные средние значения накопленных цикловых отношений приведены в табл.5. Здесь I и II – режимы нагружения соответственно рис.2.

Таблица 5.

Материал, термообработка	Диаметр образцов d , мм	Температура испытания			
		+20°C		-60°C	
		I	II	I	II
Сталь 45, нормализация, I76-207 НВ	7,52	0,9I	0,58	I, I2	0,28
	18	0,8I	0,6I	I,66	0,22
Сталь 45, улучшение, 26 – 28 НRC	7,52	I,07	0,49	0,78	0,39
	18	I, I0	0,46	I,32	0,30
Сталь 40X, нормализация, I76-207 НВ	7,52	I,42	I,05	I, I4	0, I9
	18	0,74	0,48	I,40	0,26
Сталь 40X, улучшение, 26 – 28 НRC	7,52	0,96	0,56	0,9I	0,35
	18	0,82	0,44	I,0I	0,32

Г л а в а IV. Исследование влияния циклических напряжений изгиба на статическую прочность.

Исследование проведено на гладких и надрезанных образцах ϕ 7,52 мм (тип I и 3 по табл.2). Образцы были изготовлены из стали марки 40X в состоянии улучшения, твердость 28-30 НRC.

Накопление усталостных повреждений производили при комнатной и низкой (-60°C) температурах на машине МУИ-6000. Степень нанесенных усталостных повреждений оценивали уровнем амплитуды напряжений σ_n и числом циклов нагружений N_n , они приведены в табл.6. После накопления усталостных повреждений образцы испытывали на растяжение. Статическое растяжение до разрыва производили при температурах +20°, -60° и -196°C в специальном приспособлении на универсальной разрывной машине ИМЧ-30. Одна группа образцов испытывалась на растяжение непосредственно после накопления усталостных повреж-

Таблица 6.

Тип об- раз- ца	Условия предварительных циклических нагружений при изгибе				
	Темпе- ратура °C	Ампли- туда $\sigma_n, \text{кг/мм}^2$	Отно- шение σ_n/σ_{-1}	Число цик- лов до раз- рушения N_p	Число циклов нагру- жений N_n в до- лях от N_p
Глад- кий, ф 7,52 мм, тип 3	+20	70	1,32	$5,3 \cdot 10^4$	0,189; 0,415; 0,66; 0,848
		56	1,05	$2,9 \cdot 10^5$	0,172; 0,431; 0,62; 0,862
		53	1,0	$4,5 \cdot 10^5$	0,222; 0,667
		50	0,95	—	$5 \cdot 10^5$; 10^6 (циклы)
	-60	78	1,30	$5,7 \cdot 10^4$	0,316; 0,614; 0,842
		63	1,05	$3,6 \cdot 10^5$	0,305; 0,61; 0,833
		60	1,0	$5,2 \cdot 10^5$	0,192; 0,577
		57	0,95	—	$5 \cdot 10^5$; 10^6 (циклы)
Над- реза- нный, тип I	+20	38	1,36	$2,2 \cdot 10^5$	0,2; 0,4; 0,6; 0,8
		29	1,0	$5,8 \cdot 10^5$	0,173; 0,517
	-60	42	1,31	$1,5 \cdot 10^5$	0,2; 0,4; 0,6; 0,8
		32	1,0	$4,6 \cdot 10^5$	0,215; 0,645

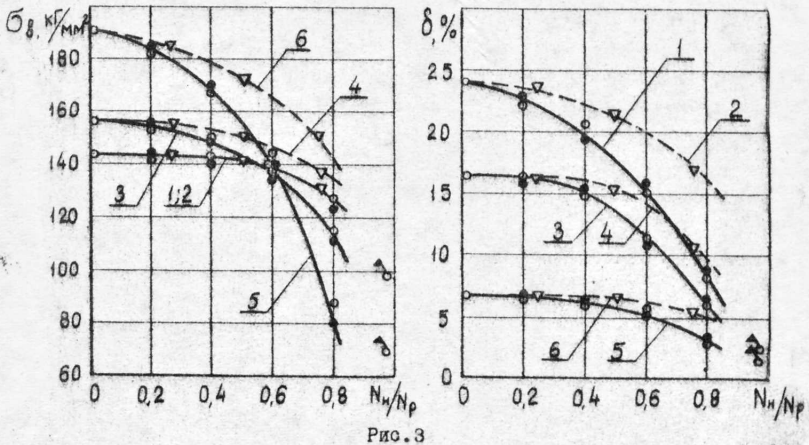


Рис. 3

Влияние циклических напряжений изгиба $\sigma_n = 1,3 \sigma_{-1}$ на прочность (σ_0) и пластичность (δ) надрезанных образцов. Сталь 40X, улучшение, 28-30 HRC

1 - при +20°C; 2 - при +20°C после "отдыха"; 3 - при -60°C; 4 - при -60°C после "отдыха"; 5 - при -196°C; 6 - при -196°C после "отдыха"; о - накопление усталостных повреждений при +20°C; $\circ$ - накопление усталостных повреждений при -60°C; ∇ - испытания с "отдыхом"

дений, вторая группа образцов после циклического нагружения перед растяжением "отдыхала" при комнатной температуре в течение 2 лет.

Получены зависимости предела прочности σ_B и характеристик пластичности (относительного сужения ψ для гладких образцов и относительного удлинения δ для надрезанных образцов при разрыве) от степени накопления усталостных повреждений.

В качестве примера на рис.3 приведены такие зависимости для образцов с круговым надрезом. Здесь N_p — число циклов нагружений, выдерживаемое образцом до усталостного разрушения при напряжении σ_n . Точки на рис.3 показывают средние значения σ_B и δ по результатам испытаний 3–5 образцов. Точки с флажками обозначают результаты испытаний образцов, имевших в месте разрыва усталостные трещины: для них число циклов нагружений условно отнесено к $N_n = 0,95 N_p$.

Г л а в а V. Исследование склонности к хрупкому разрушению.

В главе рассмотрена способность валов и осей сопротивляться разрушению от кратковременных однократных нагрузок в условиях низких температур. При таких нагрузках наибольшую опасность представляют хрупкие разрушения. Обосновывается необходимость применения методов теории вероятностей и математической статистики при оценке надежности деталей машин и элементов конструкций в отношении хрупкого разрушения. Показано, что мерой надежности деталей машин в отношении хрупкого разрушения может служить вероятность хрупкого разрушения P_{xp} , для определения которой предложена формула в виде

$$P_{xp} = P_0 \cdot P(\epsilon), \quad (3)$$

где P_0 — вероятность перехода данной детали, элемента конструкции в хрупкое состояние при данных условиях нагружения, $P(\epsilon)$ — вероятность разрушения данной детали в хрупком состоянии.

Получено распределение вероятностей перехода в хрупкое состояние P_0 в виде

$$\begin{cases} P_0 = 1 - e^{-g\ell(T_B - T)^2} & \text{при } T < T_B \\ P_0 = 0 & \text{при } T \geq T_B \end{cases}, \quad (4)$$

где T — температура эксплуатации (испытаний); T_B — наибольшая температура, при которой возможно появление хрупких разрушений деталей (образцов) при данных условиях; ℓ — длина наиболее нагруженной части детали; g — коэффициент погонной плотности хрупких сечений.

Влияние формы и размеров образцов на параметры распределения P_0 изучено при исследовании склонности валов и осей к хрупкости при ударном изгибе на образцах из стали 40X. Нормализованные образцы имели твердость 176–207 HB, улучшенные – 26–28 HRC. Форма образцов – круглые, цилиндрические; размеры образцов приведены в табл.7.

Таблица 7.

Тип образца	d, мм	a, мм	t, мм	ρ, мм	ω, град.	α _с	$\bar{G}$, I/мм	$lg L/\bar{G}$
I	II	3,0	2,5	0,26	36°15'	2,62	8,03	0,371
2	II	2,7	2,8	0,4	27°30'	2,21	5,37	0,500
3	II	3,5	2,0	0,9	10°	1,71	2,51	0,943
4	10	4,5	0,5	1,0	–	1,68	2,22	1,106
5	II	5,5	0	∞	–	1,0	1,82	2,281
6	15	7,5	0	∞	–	1,0	1,33	2,549

В табл.7 тип 5 и 6 – гладкие образцы Φ II и Φ 15 мм; тип I+4 – образцы с круговым надрезом; d – наружный диаметр образца; a – радиус сечения по надрезу; t – глубина надреза; ρ – радиус дна надреза; ω – угол раскрытия надреза; α_с – теоретический коэффициент концентрации напряжений для изгиба по Г.Нейберу; $\bar{G}$ – относительный градиент первого главного напряжения в зоне концентратора; $L=2Ta$.

Испытания на склонность к хрупкости производили по Шарпи при скорости ножа маятника в момент удара ~5 м/сек по 200–300 образцов каждого типа. Разделив образцы на хрупкие и вязкие по верхней границе работы разрушения в хрупкой области, получили экспериментальные частоты хрупкого разрушения P_0^* , являющиеся оценкой для P_0 . Полученные частоты P_0^* и функции распределения P_0 по типу (4), аппроксимирующие экспериментальные данные, приведены на рис.4 на нормальной вероятностной бумаге; номер кривой соответствует номеру образца в табл.7. Показано, что предложенное распределение для P_0 достаточно хорошо соответствует экспериментальным данным.

Получены зависимости для оценки параметров распределения вероятностей перехода в хрупкое состояние; для параметра g^e в виде

$$g^e = A_g \cdot lg L/\bar{G} + C_g, \quad (5)$$

где A_g и C_g – постоянные; для стали 40X, нормализованной, $A_g = 19,8 \cdot 10^{-5}$, $C_g = 45,3 \cdot 10^{-5}$; для стали 40X, улучшенной, $A_g = 26,5 \cdot 10^{-5}$, $C_g = 60,3 \cdot 10^{-5}$; размерность $\bar{G}$ – I/мм, g^e – I/град².

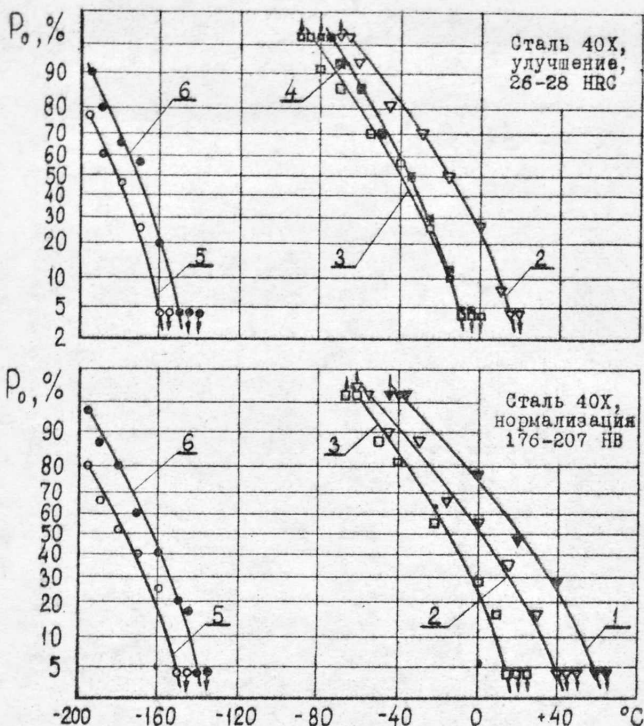


Рис. 4

Функции распределения вероятностей перехода в хрупкое состояние

При постоянной скорости нагружения параметр T_B можно оценивать по зависимости, предложенной в виде

$$T_B = A_T \cdot \lg L/\bar{G} + B_T \sqrt{\alpha_G - 1} + C_T \quad (6)$$

где A_T , B_T и C_T — постоянные при неизменной скорости нагружения.

При скорости нагружения ~5 м/сек постоянные в зависимости (6) получились равными; для стали 40X, нормализованной, $A_T = 33,6$; $B_T = 233$;

$C_T = 55,1$; для стали 40X, улучшенной, $A_T = 35,8$; $B_T = 230$; $C_T = 38,5$; размерность T_B — °К, L — мм, $\bar{G}$ — 1/мм.

Глава VI. Расчетно-экспериментальная оценка сопротивления хрупкому разрушению валов и осей при низких температурах.

Для несущей способности валов и осей, работающих при низких температурах, наибольшую опасность представляют хрупкие разрушения. В главе рассмотрены методы оценки опасности хрупкого разрушения, предложенные Н.Н. Давиденковым, Е.М. Шевандиным, А.П. Гуляевым, С.В. Серенсенем и Н.А. Махутовым, Х. Блуменауером, В.А. Винокуровым, В. Вейбуллом, В.В. Болотиным, К.В. Поповым и др. Отмечается, что применение этих методов для реальных деталей затруднено, а часто невозможно. Отмечается объективность и возможность оценки сопротивления хрупкому разрушению валов и осей с помощью вероятности хрупкого разрушения $P_{хр}$ в виде (3).

Изложена методика расчета мероятностей P_0 , $P(\epsilon)$, входящих в (3). Приведены данные по литературным источникам и настоящему исследованию, с помощью которых можно оценивать вероятность хрупкого разрушения валов и осей. Предполагается, что значение P_0 можно использовать в качестве критерия необходимости расчета вероятности хрупкого разрушения. Предложенная методика оценки сопротивления хрупкому разрушению валов и осей проиллюстрирована примером расчета вероятности хрупкого разрушения оси трехтонного подвесного блока.

Общие итоги и выводы по работе.

Проведено исследование усталостной прочности образцов типа "вал-ось" из стали 45 и 40Х в диапазоне температур от $+20^{\circ}\text{C}$ до -60°C при постоянном и переменном режиме нагружения; исследовано влияние термообработки (нормализация и улучшение), масштабного фактора и концентрации напряжений. Исследовано влияние циклических напряжений изгиба на статическую прочность и пластичность гладких и надрезанных образцов при $+20^{\circ}$, -60° и 196°C . Исследована склонность к хрупкости образцов типа "вал-ось" различных форм и размеров.

В процессе работы испытано 1200 образцов на усталость, 500 образцов на растяжение и свыше 2000 образцов на склонность к хрупкости; примерно 2/3 из них испытано при низких температурах.

Для проведения испытаний образцов при различных видах нагружения автором разработаны и под его руководством изготовлены:

1. Машины для испытаний на усталость образцов диаметром до 20 мм — 2УКМ-20 и образцов диаметром до 40 мм — УКМ-40.
2. Холодильные камеры для испытаний на усталость на машинах ММ-6000, 2УКМ-20 и УКМ-40 при температурах от $+20^{\circ}$ до -60°C .
3. Система регулирования и автоматического поддержания температуры в холодильных камерах во время усталостных испытаний.

4. Приспособление для статических испытаний на растяжение образцов диаметром до 8 мм при температурах от $+20^{\circ}\text{C}$ до -196°C .

5. Термостат для охлаждения образцов и зажима для быстрой и точной установки образцов на опоры копра.

Практическое использование разработанного оборудования и методики испытаний в лаборатории "Детали машин" МВТУ им. Н.Э. Баумана показало достаточную их надежность в лабораторных условиях.

Результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований могут быть обобщены в виде следующих основных выводов:

1. При снижении температуры от $+20^{\circ}$ до -60°C у образцов типа "вал-ось" гладких, надрезанных и со шпоночными пазами из нормализованных и улучшенных сталей марок 45 и 40Х в интервале диаметров от 5,52 до 38 мм повышаются на 5-15% пределы выносливости. При снижении температуры от $+20^{\circ}$ до -60°C у исследованных образцов на 1-5% увеличиваются эффективные коэффициенты концентрации напряжений и на 3-6% резче проявляется масштабный фактор.

2. Экспериментальные данные по пределам выносливости σ_{-1} образцов из улучшенных сталей 45 и 40Х удовлетворительно описываются уравнениями подобия усталостного разрушения при $\sigma_r = 0$ как при комнатной, так и при низких температурах. Найденные значения постоянных α , A_1 и B в уравнении подобия можно использовать в первом приближении для определения средних значений пределов выносливости деталей типа "вал-ось" в условиях низких (до -60°C) температур.

3. Изменение характеристик сопротивления усталости с понижением температуры имеет противоречивый характер: повышаются пределы выносливости, но одновременно повышаются эффективные коэффициенты концентрации напряжений и снижаются значения масштабного фактора. Считая изменение характеристик сопротивления усталости несущественным, можно при низких температурах (до -60°C) расчеты на выносливость валов и осей проводить как при нормальных условиях.

4. Данные экстраполяции полученных уравнений подобия усталостного разрушения на область больших диаметров указывают возможность снижения пределов выносливости при низких температурах по сравнению с пределами выносливости при $+20^{\circ}\text{C}$. Такая возможность не позволяет по полученным данным распространить вывод 3 на валы и оси диаметром более 250 мм при -30°C и более 120 мм при -60°C .

5. Экспериментально подтвержден теоретический вывод работы, проведенной ранее автором совместно с Д.Н. Решетовым и В.З. Фадеевым

(№2 в списке работ), что предел выносливости, определяемый по ГОСТ 2860-65 в среднем лежит ниже на 5-8% предела выносливости, соответствующего вероятности неразрушения 50%.

6. При расчете срока службы валов и осей по усталости в условиях низких температур (до -60°C) при варьируемых нагрузках является достаточно точным, как и при нормальных условиях ($+20^{\circ}\text{C}$), простой линейный закон накопления усталостных повреждений при условии отсутствия в спектре нагрузок значительных кратковременных перегрузок, т.е. в расчетах следует принимать $\alpha = 1$.

7. Кратковременные значительные перегрузки вызывает отклонение от простого линейного закона накопления усталостных повреждений, более существенное при низких температурах. Использование в таких случаях при расчете ресурса по усталости простой линейной гипотезы может привести к 5-8 кратной ошибке в сторону уменьшения запаса.

8. Циклические напряжения изгиба при $+20^{\circ}$ и -60°C оказали одинаковое влияние на механические свойства гладких и надрезанных образцов при статических испытаниях на растяжение.

9. Циклические напряжения изгиба равные или меньше предела выносливости не оказали заметного влияния на прочность и пластичность исследованных образцов при комнатной и низких температурах.

10. Циклические напряжения изгиба выше предела выносливости вызывают с ростом числа циклов нагружений падение статической прочности и пластичности при испытаниях на растяжение как у гладких, так и у надрезанных образцов, более существенное при низких температурах. Падение прочности и пластичности начинается до появления видимой усталостной трещины. Появление видимой усталостной трещины приводит к катастрофическому падению прочности и пластичности.

11. Промежуточный "отдых" при $+20^{\circ}\text{C}$ продолжительностью два года восстанавливает в некоторой степени и прочность и пластичность образцов, получивших усталостные повреждения, но не полностью.

12. Для статической прочности и пластичности валов и осей при комнатной ($+20^{\circ}\text{C}$) и низкой (-60°) температурах безопасными являются циклические напряжения изгиба с такими числами циклов нагружений, которые не переходят линию повреждаемости В.С.Ивановой.

13. Надежность деталей машин и элементов конструкций (валов и осей в частности) в отношении хрупкого разрушения предложено оценивать с помощью вероятности хрупкого разрушения $P_{\text{хр}}$, определяемой как произведение вероятности перехода в хрупкое состояние $P_{\text{х}}$ и вероятности разрушения в хрупком состоянии $P_{\text{хр}}$.

14. Предложены распределения для вероятностей P_0 в виде (4) и зависимости для оценки параметров распределения вероятностей P_0 , позволяющие учесть влияние размеров и формы образцов. Предложенные зависимости достаточно хорошо для практических целей соответствуют экспериментальным данным. Найдены параметры распределения вероятностей перехода в хрупкое состояние валов и осей из стали 40Х, нормализованной и улучшенной, при ударных изгибных нагрузках.

15. Разработана методика расчета вероятности хрупкого разрушения применительно к валам и осям; собраны литературные данные, необходимые для осуществления этого расчета. Разработанная методика может применяться и к другим типам деталей машин и элементам конструкций. Методика проиллюстрирована примером расчета вероятности хрупкого разрушения оси подвесного трехтонного блока.

16. Результаты проведенных исследований легли в основу "Рекомендаций по расчету элементов узлов и деталей строительных и дорожных машин, работающих при низких температурах". Раздел VI. "Расчет валов и осей", издание Всесоюзного научно-исследовательского института строительного и дорожного машиностроения (ВНИИСтрой-дормаш), г. Москва, 1968 г., стр. 141-162.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Н.А. Дроздов, Б.А. Байков, В.П. Тибанов. Исследование сопротивления деталей машин разрушению при низких температурах. "Проблемы прочности", 1970, № 10, стр. 88-98.

2. Д.Н. Решетов, В.З. Фадеев, В.П. Тибанов. Оценка параметров распределения пределов выносливости при испытаниях на усталость. "Вестник машиностроения", 1971, № 4, стр. 9-13.

3. Н.А. Дроздов, В.П. Тибанов. Сопротивление усталости конструкционных сталей при пониженных температурах. "Металловедение и термическая обработка металлов", 1971, № 12, стр. 46-50.

4. В.П. Тибанов. Влияние циклических напряжений изгиба на статическую прочность и пластичность стали при низких температурах. "Известия ВУЗов СССР. Машиностроение", 1972, № 2, стр. 15-19.

5. Н.А. Дроздов, В.П. Тибанов. "Влияние концентрации напряжений и масштабного фактора на сопротивление усталости при пониженных температурах". Доклад на Всесоюзном научно-техническом совещании "Прогрессивные методы и средства повышения сопротивления элементов конструкций и машин хрупкому разрушению". г. Новосибирск, 3-7 октября 1970 г.