

КИЕВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

КИ ХАЙ ШЕНЬ

КИТАИ

УДК 539.432

МАЛОЦИКЛОВАЯ УСТАЛОСТЬ МАТЕРИАЛОВ ПРИ МНОГООСНОМ  
ДЕФОРМИРОВАНИИ

Специальность 01.02.06 - Динамика, прочность машин,  
приборов и аппаратуры

А В Т О Р Е Ф Ф Р А Т

диссертации на соискание ученой степени кандидата  
технических наук

Киев - 1993

Робота виконана на кафедрі динаміки і прочності машин  
і опротивлення матеріалів Київського політехнічного інститута

Научні керівники - доктор технічних наук, професор  
Н.С.Можаровський

- кандидат технічних наук, доцент  
С.Н.Шукаєв

Офіційні опоненти - доктор технічних наук,  
в.н.с. В.П.Голуб

- кандидат технічних наук,  
с.н.с. С.Р.Игнатович

Ведущая організація - Інститут проблем прочності, г. Київ

Захист состоится "10" 05 1993 г. в "15" часов  
на засіданні спеціалізованого Ради Д 068.І4.04 в Київському  
політехнічному інституті (252056, Київ-56, проспект Перемоги,  
37, КПІ-І201). Корп. І. ауд. 166.

С дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці КПІ.

Автореферат розослан "07" 04 1993 г.

Учений секретарь

спеціалізованого Ради  
кандидат технічних наук,  
доцент

*Е.Е. Онисенко*  
Онисенко Е.Е.

ЛНБ України ім.В.Стефаніка



00803144 (K)

ЛНБ ім. В. Стефаніка  
АН України

## АННОТАЦИЯ

Целью диссертационной работы является экспериментально-теоретическое исследование поведения материалов при многоосном малоцикловом нагружении, обоснование пределов применимости критериев малоцикловой усталости в условиях пропорционального и непропорционального упругопластического циклического деформирования.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи: разработаны программа и методика исследований; экспериментально исследованы закономерности упругопластического деформирования и долговечность титанового сплава ВТ9 при пропорциональном и непропорциональном нагружениях; осуществлен сравнительный анализ экспериментальных и расчетных результатов, полученных на основании ряда известных критериев малоцикловой усталости.

Автор защищает:

1. Новые экспериментальные данные по упругопластическому деформированию сплава ВТ9 в условиях пропорционального и непропорционального двухосного малоциклового нагружения.
2. Уравнение малоцикловой усталости с универсальными постоянными для случая одноосного нагружения.
3. Методику расчета по обобщенному критерию малоцикловой усталости при многоосном нагружении Макинда и Нила для случая, когда гипотеза о подобии кривых равной долговечности не выполняется.
4. Критерий малоцикловой усталости для случая пропорционального нагружения материала осевой силой и крутящим моментом.

### ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Увеличение рабочих параметров современных машин при одновременном снижении их металлоемкости приводит к возрастанию как общей, так и местной напряженности конструкции с выходом в зонах концентрации напряжений за пределы упругости. Эксплуатационная нестационарность нагружения элементов конструкций приводит к работе материала в условиях циклического деформирования. Таким образом ресурс многих ответственных элементов конструкций современной техники определяется малоцикловой усталостью. Применяемые при этом методы расчета, как правило, основываются на экспериментальных результатах, полученных при одноосном (растяжение - сжатие) циклическом нагружении. По-

сколькx большинство элементов машин и механизмов работают в условиях многоосного циклического нагружения, то традиционные расчетные методы могут существенно завышать реальные возможности материала, что, в свою очередь, приводит к снижению ресурса и надежности агрегатов в целом. Это обуславливает актуальность разработки методов, уравнений и критериев прогнозирования ресурса и описания поведения конструкционных материалов при малоцикловом нагружении в условиях сложного напряженного состояния.

Общая методика исследований заключалась в последовательном применении экспериментального и аналитического методов для решения поставленной задачи. В основе экспериментального метода лежало моделирование однородного плоского напряженного состояния в тонкостенном трубчатом образце. Аналитический метод основывался на тензорном анализе в приложении к механике сплошных сред с применением известных критериев малоцикловой прочности. При планировании экспериментальных исследований и обработке опытных данных использовались методы многофакторного регрессионного анализа и математической статистики.

Научная новизна работы. Получены закономерности упругопластического деформирования и построены кривые малоцикловой усталости сплава ВТ9 при пропорциональном и непропорциональном циклическом нагружении. Определены пределы применимости ряда критериев малоцикловой усталости для одноосного и многоосного нагружения.

Предложено уравнение малоцикловой усталости с универсальными постоянными для случая одноосного нагружения.

Разработана методика расчета по обобщенному критерию малоцикловой усталости при многоосном нагружении Макинда и Нила для случая, когда гипотеза о подобии кривых равной долговечности не выполняется. Получен и апробирован на ряде конструкционных материалов критерий малоцикловой усталости в условиях пропорционального нагружения осевой силой и крутящим моментом.

Практическая ценность работы. Теоретические и экспериментальные результаты работы могут быть использованы при дальнейшей разработке теории пластичности, а также уравнений состояния и критериев малоцикловой усталости.

Предложенные методы расчета долговечности при пропорциональном нагружении позволяют с большей достоверностью, чем традиционно применяемые подходы, прогнозировать ресурс материала.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы доложе-

ны на: Научном совещании "Термовязкоупругопластические процессы деформирования в элементах конструкций" (г.Канев, 1992 г.), IУ симпозиуме "Прочность материалов и элементов конструкций при сложном напряженном состоянии" (г.Севастополь, 1992 г.), III симпозиуме "Устойчивость и пластичность в механике деформированного твердого тела" (г.Тверь, 1992 г.), научных семинарах лаборатории "Прочности и пластичности" КИИ (1989-1993 г.г.).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 5 печатных работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов и библиографии. Основное содержание работы изложено на 160 страницах и включает 44 рисунка и 22 таблицы.

#### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Для расчета несущей способности современных конструкций и деталей машин, подвергающихся в процессе эксплуатации сложному комплексу циклически изменяющихся нагрузок, необходимо знать поля напряжений и деформаций в зонах максимальной напряженности, а также поведение материала при упругопластическом циклическом деформировании. На основании последнего постулируются условия возникновения предельных состояний - нарушение прочности, появление недопустимых перемещений и т.д. Наиболее интенсивно разрабатываемым направлением при создании критериев малоциклового прочностного при многоосном нагружении является концепция эквивалентных параметров. Согласно этой концепции, выбирая соответствующий эквивалентный параметр, сложное напряженное состояние приводит к эквивалентному линейному напряженному состоянию. На практике широко используются эквивалентные параметры, являющиеся прямым применением критериев пластического течения. Ярким развитием данного подхода явились работы М.Брауна и К.Миллера, которые предложили при описании многоосной малоциклового усталости использовать два параметра: максимальную сдвиговую деформацию и нормальную деформацию в плоскости максимального сдвига. В настоящее время существует значительное число модификаций данного подхода. Обобщающей работой в этом направлении, по-видимому, является работа А.Макинды и К.Нила в которой предложена методика построения функции разрушения и описание на ее базе кривых равной долговечности. Авторы показали, что все ранее предложенные в рамках эквивалентного подхода критерии являются частными случаями описанной ими функции разрушения.

Следует отметить, что критерии построенные в рамках эквивалентного подхода применяются, как правило, для описания пропорционального нагружения. Они не учитывают влияния истории нагружения, либо соответствуют частному ее виду, так как все они формулируются в виде тех или иных алгебраических уравнений.

Как показывают многочисленные исследования, процессы сложного циклического деформирования не удается описать при помощи уравнений состояния, полученных на основе экспериментальных данных при простом нагружении.

В связи с этим разработка критериев малоциклового усталости при непропорциональном нагружении должна основываться на результатах испытаний, проведенных в условиях сложного циклического нагружения.

На основании анализа литературных данных сформулированы цели и задачи исследования, разработана программа экспериментов. В программу исследования входили: статические испытания на растяжение и кручение, с целью определения основных механических характеристик сплава ВТ9 и чувствительности материала к виду напряженного состояния; испытания на малоцикловую усталость стандартных сплошных цилиндрических образцов при одноосном растяжении - сжатии для построения кривой усталости, используемой в традиционных методах расчета на малоцикловую прочность; испытания на малоцикловую усталость по пропорциональным и непропорциональным траекториям деформирования (рис.1 а, б, в).

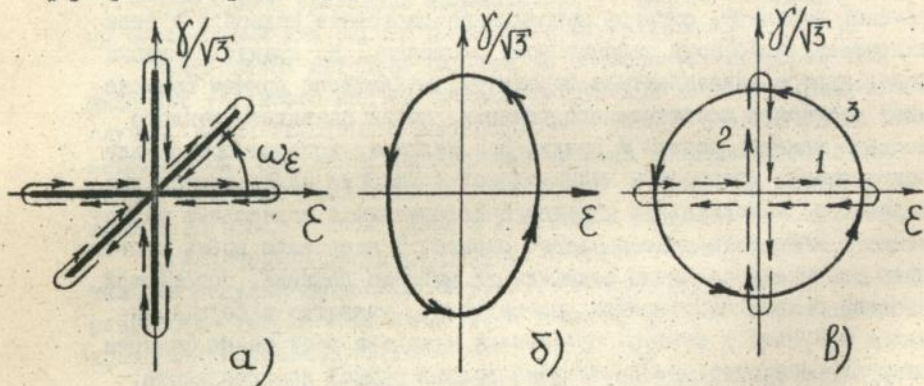


Рис.1. Траектории деформирования: а) - пропорциональное нагружение, б) - непропорциональное нагружение, в) - программное нагружение.

В качестве независимых факторов, определяющих форму и размеры траектории деформирования, были приняты:

максимальное значение интенсивности полной деформации в цикле,  $\omega_\epsilon = \arctg(\delta/\sqrt{3}\epsilon)$  - угол ориентации траектории деформирования и  $Q$  - угол сдвига фаз между осевой деформацией и деформацией кручения.

Исследования проводили при комнатной температуре по пилообразному, симметричному циклу изменения осевой и сдвиговой деформации (жесткий режим) с частотой, близкой к  $1/60 \text{ с}^{-1}$  на базе до  $4 \cdot 10^3$  циклов.

При испытаниях материала по пропорциональным траекториям деформирования использовали методы планирования многофакторного эксперимента. Построение математической модели процесса осуществляли по полному факторному эксперименту  $2^3/9$  (два фактора на трех уровнях, всего девять опытов).

Факторная модель постулировалась в виде ортогональных полиномов Чебышева. Натуральные и кодированные значения уровней варьирования переменных с формулами перехода от одних к другим приведены в табл. I.

Таблица I

Натуральные и кодированные значения уровней варьирования факторов при пропорциональном нагружении

Номер фактора	Наименования и натуральные обозначения факторов	Значения уровней факторов	Уровни		Формулы перехода от натуральных значений факторов к кодированным
1	Максимальное значение интенсивности деформации,	0,007	-I	I	$x_1 = \frac{1}{0,003} (\epsilon_a^* - 0,01)$ $z_1 = 3(x_1^2 - 2/3)$
		0,010	0	-2	
		0,013	I	I	
2	Угол ориентации траектории деформирования,	0	-I	I	$x_2 = \frac{1}{45} (\omega_\epsilon - 45)$ $z_2 = 3(x_2^2 - 2/3)$
		45	0	-2	
		90	I	I	

За функцию отклика принимали десятичный логарифм числа циклов до возникновения сквозной трещины в стенке трубчатого образца, которая фиксировалась при помощи специального приспособления.

Программа испытаний реализовывалась на экспериментальном комплексе "УСНС-3", разработанном и созданном на кафедре ДМ и СМ КПИ. Комплекс позволяет проводить статическое и циклическое нагружение образцов осевой силой и крутящим моментом по произвольным траекториям как в пространстве напряжений (мягкий режим), так и в пространстве деформаций (жесткий режим).

В качестве объекта исследования был выбран титановый сплав BT9, широко применяемый для изготовления деталей реактивных и газотурбинных двигателей (диски, лопатки, кольца, крепежные и другие детали).

Образцы изготавливались из прутков катанных диаметром 25 мм в состоянии поставки. Было изготовлено два типа образцов: пропорциональные цилиндрические с диаметром рабочей части 4 мм и тонкостенные трубчатые образцы с номинальными размерами: наружный диаметр - 11 мм; толщина стенки - 0,5 мм; рабочая длина трубки - 20 мм.

На сплошных образцах при одноосном растяжении были получены следующие механические характеристики: модуль Юнга - 118 ГПа; предел пропорциональности - 760 МПа; условный предел текучести - 865 МПа; предел прочности 975 МПа; относительное удлинение - 17%; относительное сужение - 45%. Из испытаний трубчатых образцов на кручение были определены: модуль сдвига - 43 ГПа; предел пропорциональности при кручении - 480 МПа; условный предел текучести при кручении - 550 МПа. При достижении угловой деформацией величины близкой 5% во время испытаний на кручение происходила потеря устойчивости образца. Сопоставление начальных участков статических диаграмм растяжения и кручения в координатах интенсивность напряжений - интенсивность деформаций не выявило чувствительности материала к виду напряженного состояния (диаграммы практически совпали).

Испытания на малоцикловую усталость при растяжении - сжатии проводили и на сплошных, и на трубчатых образцах (рис.2). По результатам испытаний для каждого типа образцов проводили построение кривой усталости в малоцикловой области, соответствующей вероятности разрушения 50%, а также диаграмм упругопластического деформирования, определяли их параметры. Долговечность трубчатых образцов оказалась значительно меньшей чем долговечность сплошных образцов при равных амплитудах полной деформации. Это, по-видимому, объясняется конструктивными особенностями трубчатого об-

разца (например, наличие двух поверхностей механической обработки).

Согласно программе испытаний при пропорциональном нагружении, на трубчатых образцах были также выполнены испытания на знакопеременное кручение ( $\omega_e = 90^\circ$ ) и на синфазное нагружение осевой силой и крутящим моментом ( $\omega_e = 45^\circ$ ). В табл. 2 приведены матрица планирования, экспериментальные и расчетные результаты. На основании полученных результатов, используя стандартные процедуры регрессионного анализа, для двух уровней значимости  $\alpha_1 = 0,05$  и  $\alpha_2 = 0,005$  построили уравнения регрессии, описывающие зависимость между десятичным логарифмом числа циклов до разрушения (появление сквозной трещины в образце) и параметрами траектории деформирования, соответственно:

$$y_1 = \lg N = 2.5893 - 0.4627 \cdot x_1 + 0.0333 x_1 + 0.2612 x_2 - 0.1895 x_1 x_2 + 0.0443 x_1 \cdot x_2, \quad (1)$$

$$y_2 = \lg N = 2.5893 - 0.4627 x_1 + 0.2612 x_2 - 0.1895 x_1 x_2 \quad (2)$$

В уравнении (2) была произведена замена кодированных значений факторов их натуральными величинами. После потенцирования получили следующую зависимость:

$$N = 10^{(3.2388 - 91.067 e_0^* + 0.0198 \omega_e - 1.4037 e_0^* \omega_e)} \quad (3)$$

Изучение сопротивления малоциклового усталости образцов из сплава ВТ9 при непропорциональном нагружении проводили по несинфазным траекториям с параметрами:  $\omega_e = 55^\circ$  и  $Q = 90^\circ$ . Результаты испытаний представлены в табл.3.

Здесь  $W_p$  и  $W_k$  - площади петель гистерезиса, соответствующие работам, выполняемым на осевых и сдвиговых пластических деформациях за цикл.

Характеристики диаграмм упругопластического деформирования, помещенные в табл.3, определяли из петель гистерезиса, соответствующих половине числа циклов до образования сквозной трещины в образце. Сопоставление кривых усталости при пропорциональных и непропорциональных траекториях деформирования (рис.2) показывает, что непропорциональное нагружение приводит к уменьшению долговечности. В сравнении с растяжением - сжатием долговечность падает в 2 раза, а в сравнении с кручением - в 3-5 раз, в зависимости от уровня деформаций.

На рис.3 изображены типичные стабилизированные петли гистерезиса, полученные в испытаниях по несинфазным траекториям и,

Таблица 2  
Рабочая матрица и результаты эксперимента и расчета по  
моделям долговечности

Факторы		Функция отклика		Результаты расчетов			
$\epsilon_a$ , %	$\omega_e$ , град	$lg N_T$		Расчетные значения опытов		Относительная погрешность, %	
		$y_1$	$y_2$	$\alpha = 0,05$	$\alpha = 0,005$	$\alpha = 0,05$	$\alpha = 0,005$
0.7	0	2.594	2.577	2.590	2.601	0.155	0.580
1.0	0	2.332	2.358	2.351	2.328	0.256	0.720
1.3	0	2.041	2.045	2.044	2.044	0.049	0.590
0.7	45	3.144	3.042	3.085	3.052	0.259	1.326
1.0	45	2.487	2.580	2.523	2.589	0.473	2.130
1.3	45	2.223	2.100	2.160	2.127	0.046	1.573
0.7	90	3.550	3.602	3.580	3.503	0.112	2.041
1.0	90	2.766	2.614	2.696	2.851	0.223	5.985
1.3	90	2.310	2.240	2.276	2.198	0.044	3.380

соответственно, при растяжении-сжатии и знакопеременном кручении для равных амплитуд деформаций. Экспериментально показано, что переход от пропорционального нагружения к непропорциональному приводит к изменению формы и количественных значений характеристик петель пластического гистерезиса. Для детального исследования эффектов, характерных для непропорционального циклического деформирования были проведены программные испытания (рис. 1, в), включающие этапы пропорционального циклического нагружения (траектории 1 и 2) и циклического нагружения с постоянной интенсивностью деформации (траектория 3). На всех этапах максимальное значение интенсивности деформации в цикле  $\epsilon_a^* = 1\%$  поддерживалось постоянным. Каждый этап состоял из 20 циклов.

Анализ полученных результатов показал, что циклическое деформирование в одном направлении не приводит к заметному упрочнению материала в других направлениях, т.е. эффект "Поперечного упрочнения" для сплава ВТ9 не наблюдается. Эффект "дополнительного упрочнения" при переходе от пропорционального нагружения к непропорциональному также не наблюдался, так как величина максимального значения интенсивности напряжения в цикле практически оставалась постоянной. При этом выявлено, что с переходом от пропорционального

Таблица 3

Результаты испытаний на малоцикловую усталость сплава ВТ9 при непропорциональном нагружении

№	Задаваемые параметры деформирования			Опытные данные							
	$\epsilon_a^*$ , %	$\epsilon_a$ , %	$\gamma$ , %	$\sigma_a$ , МПа	$\tau_a$ , МПа	$\epsilon_{ps}$ , %	$\gamma_{ps}$ , %	$W^p$ , МДж/м <sup>3</sup>	$W^2$ , МДж/м <sup>3</sup>	$W$ , МДж/м <sup>3</sup>	$N_7$ , циклов
1	0,7	0,50	1,21	553	442	0,05	0,25	0,64	4,24	4,88	277
2	0,7	0,50	1,21	571	431	0,04	0,25	0,71	4,10	4,81	290
3	1,0	0,72	1,73	740	471	0,15	0,43	3,42	5,52	8,94	105
4	1,0	0,72	1,73	731	490	0,12	0,41	3,23	5,13	8,36	178
5	1,3	0,95	2,25	823	520	0,26	0,26	0,83	8,50	13,20	68
6	1,3	0,95	2,25	814	531	0,25	0,84	7,51	13,17	20,68	68

нагружения к непропорциональному значительно изменяются амплитуда пластических деформаций и, как следствие, работа на пластических деформациях за цикл. Чередование этапов пропорционального и непропорционального нагружения не вызывает заметных изменений параметров соответствующих диаграмм циклического деформирования. Таким образом, установлено, что в материале существует несколько, зависящих от траектории деформирования состояний стабилизации.

Наряду с экспериментальной кривой усталости сплава ВТ9 при одноосном растяжении-сжатии получены ее расчетные оценки на основе ряда известных уравнений кривой малоцикловой усталости с универсальными постоянными (Мэнсона, Лэнджера, Муралидхарана-Мэнсона, норм прочности). Было проведено сопоставление опытных и расчетных значений амплитуд не только полных деформаций, но также их упругих и пластических составляющих. Проведенный анализ позволил сделать вывод о том, что для сплава ВТ9 наилучшим уравнением для оценки усталостных свойств материала являлось бы такое уравнение, где пластическая составляющая описывалась также как и в уравнении Лэнджера, а упругая составляющая как в уравнении Мэнсона. Таким образом, предложено следующее уравнение с универсальными постоянными

$$\sigma_a = \epsilon_{pa} + \epsilon_{ya} = \frac{1}{4} N^{-m} \ln \frac{100}{100 - \psi_k} + 1,75 \frac{\sigma_B}{E} N^{-0,12} \quad (4)$$

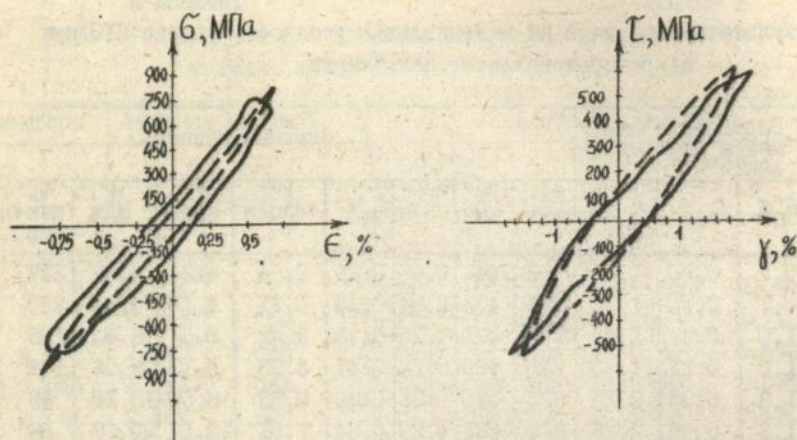


Рис.3. Циклические диаграммы деформирования /— непропорциональное нагружение; --- пропорциональное нагружение /.

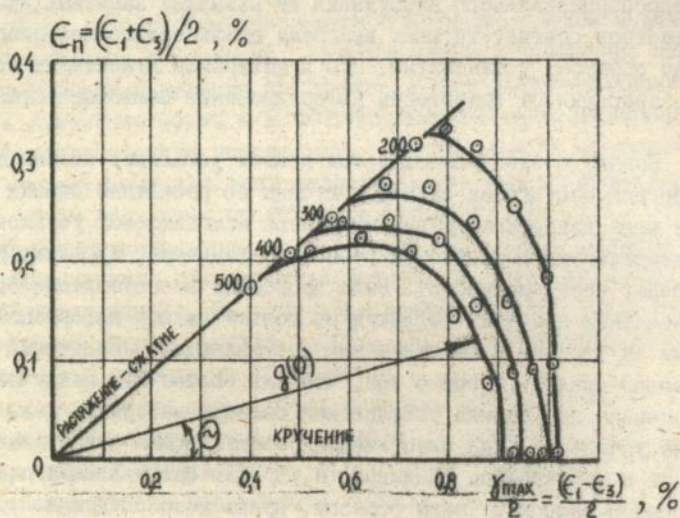


Рис.4. Сравнение расчетных контуров равной долговечности /сплошные линии/ с экспериментальными результатами для сплава ВТ9.

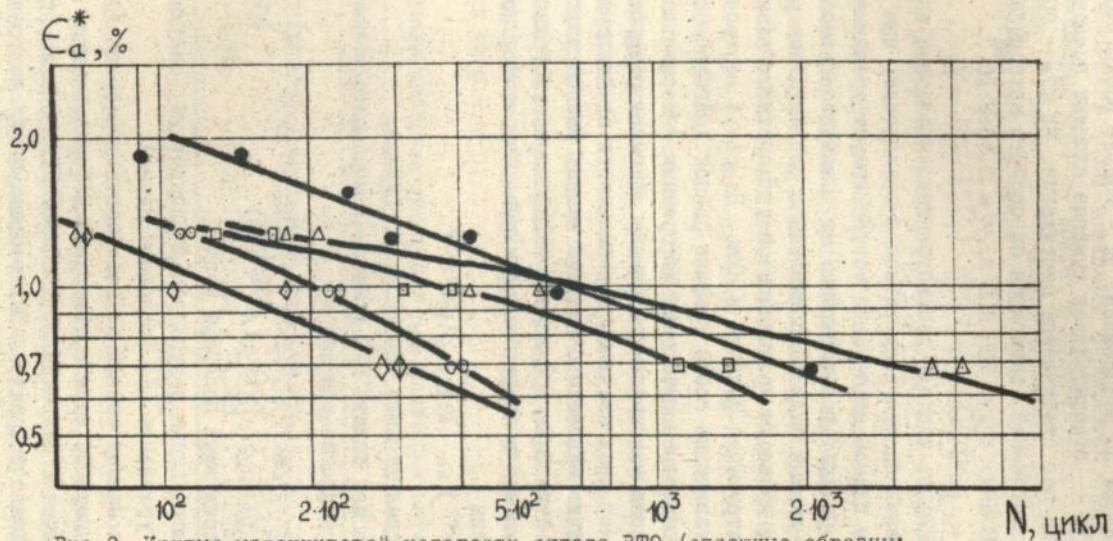


Рис.2. Кривые малоциклового усталости сплава ВТ9 /сплошные образцы:

● -  $Q=0^\circ, \omega_e=0^\circ$ ; трубчатые образцы: ○ -  $Q=0^\circ, \omega_e=0^\circ$ ; □ -  $Q=0^\circ, \omega_e=45^\circ$ ;  
 Δ -  $Q=0^\circ, \omega_e=90^\circ$ ; ◇ -  $Q=90^\circ, \omega_e=55\%$ .

где  $N$  - число циклов до разрушения;  $E$  - модуль продольной упругости, МПа;  $\psi_k$  - относительное сужение площади поперечного сечения образца при статическом растяжении, %;  $\sigma_B$  - предел прочности;  $m$  - постоянная, зависящая от свойств материала ( $m = 0,5$  при  $400 \text{ МПа} < \sigma_B < 700 \text{ МПа}$  и  $m = 0,36 + 2 \cdot 10^{-4}$  при  $700 \text{ МПа} < \sigma_B < 1200 \text{ МПа}$ ).

Расчеты показали, что для рассмотренного диапазона долговечностей наименьшее среднеквадратическое отклонение, при определении амплитуды полной деформации соответствует уравнению (4).

При анализе результатов испытаний на пропорциональное нагружение опытные данные были сопоставлены с результатами расчета по обобщенному критерию малоциклового усталостного разрушения при многоосном нагружении Макинда и Нила. На рис.4 построены "Г-планы", представляющие собой графики равной долговечности в координатах: максимальная сдвиговая деформация - нормальная деформация в плоскости максимального сдвига. Функция разрушения сплава ВТ9 изменяет свои значения в зависимости от долговечности, что противоречит гипотезе о подобии кривых равной долговечности. В связи с этим было предложено модифицировать уравнение поверхности разрушения и ввести корректирующую функцию, которая имеет следующий вид

$$K(N, f_1^{200}) = 0,8 + 0,001N \quad (5)$$

где  $f_1^{200}$  - базовая функция при  $N = 200$  циклов.

Окончательно для сплава ВТ9 уравнение описывающее поверхность разрушения записывается так

$$g(\theta, N) = (0,8 + 0,001N)(1,09239 + 0,000203 \cdot \theta - 0,00049 \theta^2, (0,131N^{-0,488})) \quad (6)$$

где  $\theta$  - соответствующий полярный угол.

На рис.4 сопоставлены результаты эксперимента (светлые кружки) и расчета по уравнению (6) (сплошные линии).

Для описания кривых равной долговечности требуется провести испытания как минимум по трем траекториям деформирования. Анализ статистических моделей долговечности сплава ВТ9 показал, что число испытаний можно сократить. Зависимость между долговечностью и факторами нагружения можно описать следующим линейным относительно главных эффектов уравнением:

$$\lg N = \beta_0 + \beta_1 \epsilon_a^* + \beta_2 \omega_e + \beta_3 \epsilon_a \omega_e \quad (7)$$

Ортогональность плана позволяет определить коэффициенты регрессии независимо друг от друга. В соответствии с этим правую часть уравнения (7) после потенцирования можно представить в виде произведения двух функций

$$N = \Phi_1(\epsilon_a^*) \Phi_2(\omega_\epsilon, \epsilon_a^*), \quad (8)$$

где  $\Phi_1 = 10^{(\beta_0 + \beta_1 \epsilon_a^*)}$ ,  $\Phi_2 = 10^{(\beta_2 \omega_\epsilon + \beta_3 \epsilon_a^* \omega_\epsilon)}$

При  $\omega_\epsilon = 0$  функция  $\Phi_2 = 1$  и уравнение (8) описывает кривую малоциклового усталости при растяжении-сжатии. Вместо функции можно использовать другие зависимости, например степенную типа Коффина-Мэнсона. После такой замены уравнение (8) приобретает вид:

$$N = C \cdot \epsilon_a^* \cdot 10^{(\beta_2 \omega_\epsilon + \beta_3 \epsilon_a^* \omega_\epsilon)} \quad (9)$$

где  $\beta_2$  и  $\beta_3$  - константы для определения которых необходимо знать кривую усталости при кручении или ином виде пропорционального нагружения.

Предложенный подход был апробирован при обработке результатов испытаний ряда конструкционных материалов. Значения постоянных, входящих в уравнение (9), для рассмотренных материалов приведено в табл.4.

Таблица 4

Значения констант уравнения для некоторых материалов

Материал	C	m	$\beta_2$	$\beta_3$
BT9	0.018	-2.02	0.01980	-1.4037
OBX18N10T	2.48	-4.09	0.00471	-
SUS 304	7.495	-2.84	-0.00047	0.5824
IGr - IMo - I/4V	0.142	-1.45	0.01287	-1.090

#### Основные результаты работы

I. Экспериментально установлены закономерности упругопластического деформирования титанового сплава BT9 при  $T = 293K$  в условиях пропорционального и непропорционального малоциклового нагружения. Показано существенное влияние непропорциональности нагружения на характеристики циклической пластичности и долговечности сплава.

О специфичности поведения материала при непропорциональном нагружении свидетельствует факт отсутствия эффектов "дополнитель-

ного" и "поперечного" упрочнений, характерных для нержавеющей сталей. Представление экспериментальных результатов в виде регрессионных моделей позволило повысить достоверность и информативность полученных опытных данных, облегчило их анализ.

2. Установлены пределы применимости ряда известных уравнений с универсальными постоянными (Мэнсона, Лэнджера и их модификаций) для случая одноосного растяжения-сжатия. Показано, что для сплава ВТ9 лучшее согласие между опытными и расчетными значениями достигается при использовании уравнения предложенного автором и являющегося комбинацией уравнений Мэнсона и Лэнджера.

3. Установлены пределы применимости обобщенного критерия малоциклового усталости, предложенного Макиндом и Нилом в условиях пропорционального нагружения. Приведена модификация данного критерия для материалов аналогичных сплаву ВТ9, когда гипотеза о подобии кривых равной долговечности не выполняется.

4. Для случая пропорционального нагружения материала осевой силой и крутящим моментом разработан критерий малоциклового усталости в виде произведения двух функций. Первая функция описывает кривую усталости при одноосном растяжении-сжатии (например уравнение Коффина-Мэнсона), а вторая функция описывает влияние вида деформированного состояния на долговечность материала. Точность расчетов по данному критерию приближается к точности уравнений регрессии.

Основные результаты работы отражены в следующих публикациях:

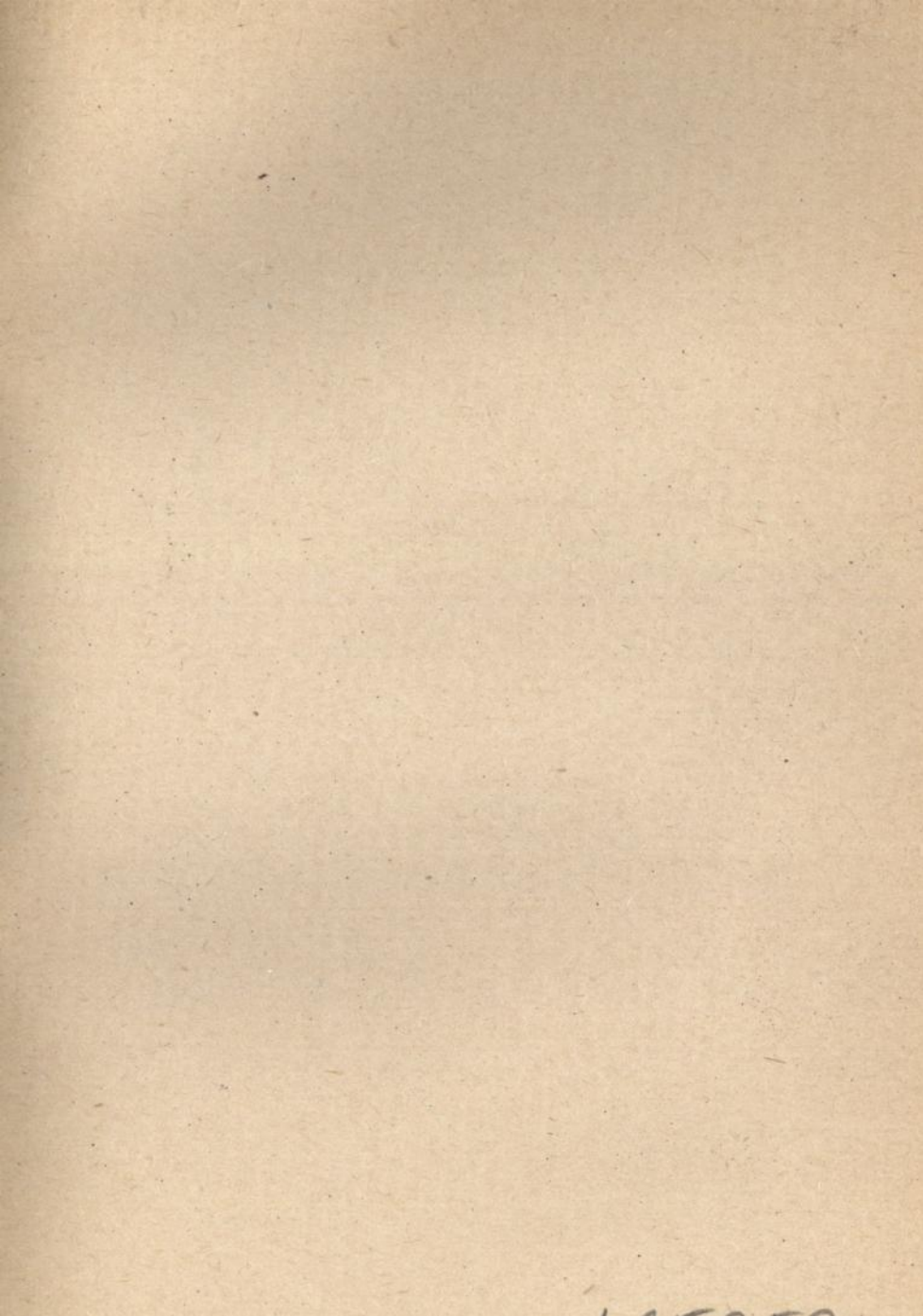
1. Расчет замковых соединений ГТФ и малоцикловая прочность дисковых материалов в условиях плоского напряженного состояния. - В кн.: Тез. доклада Научного совещания "Термовязкопластические процессы деформирования в элементах конструкций", Канев, 1992, - с.60 (соав. Мохаровский Н.С., Заховайко А.А., Шукаев С.Н., Овсиенко А.Б.). Соискателем проведено исследование долговечности сплава ВТ9 при пропорциональном нагружении.
2. Малоцикловая усталость титановых сплавов при сложном напряженном состоянии. - В кн.: IV симпоз. "Прочность материалов и элементов конструкций при сложном напряженном состоянии", Тез. докл., Севастополь, 1992 г., с.48-49 (соав. Мохаровский Н.С., Заховайко А.А., Шукаев С.Н., Овсиенко А.Б.). Соискателем проведено исследование долговечности сплава ВТ9 при непропорциональном нагружении.

3. Пластичность стали 08Х18Н10Т при многоосном циклическом нагружении. - В кн.: III симпоз. "Устойчивость и пластичность в механике деформируемого твердого тела" Тез. докл., Тверь, 1992. - с.31-32 (соавт. Шукаев С.Н.). Соискателем проведен расчет диаграмм циклического деформирования стали 08Х18Н10Т.
4. Применение поверхностей текучести типа Мизеса и Треска в расчетах на малоцикловую прочность при многоосном нагружении // Вестник Киев. политехн. ин-та. Машиностроение. - 1993. - Вып. 29. - С.35-42 (соавт. Шукаев С.Н.). Соискателем проведен расчет по многоповерхностной теории пластического течения Мруза с использованием поверхности нагружения Треска.
5. Долговечность конструкционных материалов при многоосном пропорциональном малоцикловом нагружении // Пробл. прочности. - 1993. - № 5. - С.49-55 (соавт. Шукаев С.Н.). Соискателем построены статистические модели долговечности для ряда конструкционных материалов.

Подл. к печ. 31.03.93      Формат 60·84/8      Бумага 70/80  
Печ. офс. Усл. печ. л. 0,93      Уч. изд. л. 0,66      Тираж 100.  
Зак. 3-3474

---

Киевская книжная типография научной книги. Киев, Репина, 4.



**AB 27.175**