

# ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ РАЗРУШЕНИЯ ПРИ МАЛОЦИКЛОВОМ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

ГУСЕНКОВ А. П., КАЗАНЦЕВ А. Г., ЧЕРНЫХ А. Н., ГИНСТЛЕР Я.

(ИМАШ АН СССР)

Кафедра технологии материалов электромышленности

Будапештский Технический Университет

Поступило 25 сентября, 1980 г.

Представлено проф. д-р Я. Прохаска

Эксплуатация высоконагруженных и маневренных конструкций часто происходит в условиях, когда циклическое изменение нагрузок сопровождается изменением температурного режима работы. Такие условия эксплуатации характерны для различных видов энергетического и химического оборудования, авиационной и ракетной техники и т. д. Обоснование методов расчета на малоцикловую прочность элементов конструкций, работающих при переменных температурах, требует разработки и экспериментальной проверки критерия, описывающего условия достижения предельного состояния по разрушению (образованию трещины).

В настоящей работе приводятся результаты исследования условий разрушения при малоцикловом неизотермическом нагружении ряда конструкционных материалов — сталей Х18Н9, ЭИ-654, 15Х2МФА, Р2М и 22К, характеризующихся контрастными статическими и циклическими свойствами. Так в исследованных диапазонах рабочих температур стали Х18Н9 и 22К являются циклически стабилизирующимися материалами, стали 15Х2МФА и Р2М — циклически разупрочняющимися, а сталь ЭИ-654 — циклически упрочняющимся материалом. При этом стали Х18Н9 и 22К имеют выраженную зависимость располагаемой пластичности от времени, а стали ЭИ-654, 15Х2МФА и Р2М обладают практически неизменной длительной пластичностью. Располагаемая пластичность материала определяется по результатам испытаний на длительную прочность (пластичность) или длительный статистический разрыв.

Показано, что характер накопления усталостных и квазистатических повреждений в значительной степени обусловлен реализующейся комбинацией циклов нагружения и нагрева, диапазоном изменения температуры, а также механическими свойствами каждого конкретного типа материала, определяющими поцикловое изменение необратимых деформаций.

Достижение предельного состояния по условиям малоциклового неизотермической прочности во всех испытаниях трактовалось с позиций деформационно-кинетического критерия в виде

$$\int_0^{N_f} \frac{dN}{N_i(t, T_{\text{var}})} + \int_0^{N_f} \frac{e_{\text{ir}} dN}{\varepsilon_f(t, T_{\text{var}})} = 1, \quad (1)$$

где  $N_i(t, T_{\text{var}})$  — определяется при заданной в цикле нагружения деформации по кривой усталостного разрушения в условиях жесткого нагружения с учетом частоты (времени) и формы циклов нагружения и нагрева;  $N_f$  — число циклов до разрушения (появления трещины);  $e_{\text{ir}}$  — односторонне накопленная в цикле деформация;  $\varepsilon_f(t, T_{\text{var}})$  — располагаемая пластичность при монотонном нагружении в неизотермических условиях.

Согласно соотношению (1) предельное состояние материала определяется накоплением повреждений критической величины, причем суммирование усталостного — первый член (1) и квазистатического — второй член (1) повреждений осуществляется в линейной форме. В условиях жесткого нагружения повреждение определяется первым членом, а при испытаниях на статическое растяжение или длительную прочность — вторым членом (1), в силу чего указанные виды испытаний являются базовыми, позволяющими определить параметры уравнения (1) для заданных циклов нагружения и нагрева.

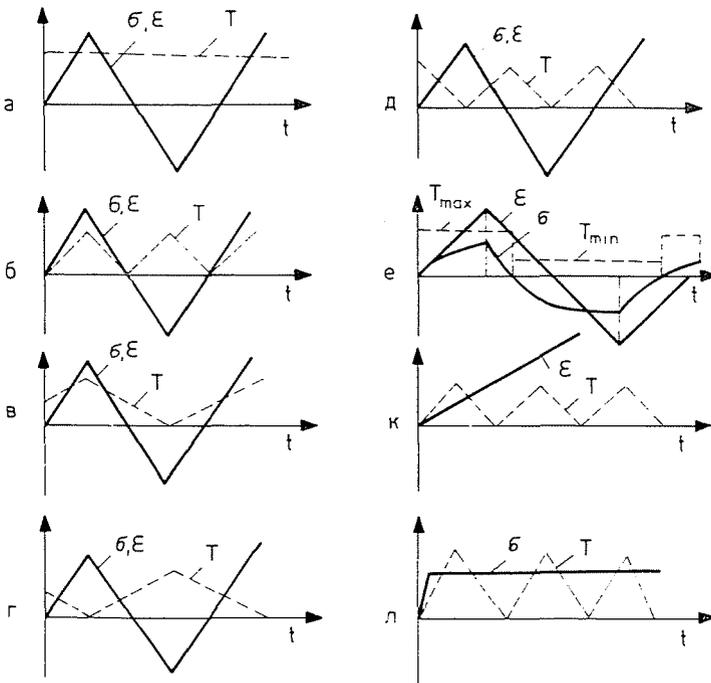


Рис. 1. Режимы неизотермического нагружения

Испытания проводились на сплошных образцах корсетного типа в режимах жесткого, мягкого и длительного статического изотермического и неизотермического нагружений на программной машине типа УМЭ-10ТП, позволяющей осуществлять независимо нагружение и нагрев образцов по методике, описанной в (1, 2). Уровень и диапазон изменения температуры выбирался с учетом реальных условий работы каждого конкретного материала. Циклическое нагружение осуществлялось при линейной изменении деформаций (нагрузок) во времени. Температура изменялась как линейно, так и ступенчато (рис. 1, а—е). В последнем случае изменение температуры от минимальной до максимальной, или наоборот, происходило в ограниченный промежуток времени, в момент перехода нагрузки через нулевое значение. При этом испытательная машина (в случае жесткого режима нагружения) переходит на регулирование по силе и в течение некоторого времени ( $\sim 1$  мин), достаточного для нагрева (или охлаждения) образца до заданного уровня температуры поддерживается нагрузка  $P=0$ . Режимы нагружения и диапазоны изменения температуры для каждого из исследованных материалов представлены в таблице 1.

Все испытания проводились при симметричном изменении нагрузки или деформации в цикле соответственно для мягкого и жесткого режимов нагружения, за исключением мягкого режима с противофазным сочетанием нагрузки и температуры. В последнем случае для того,

Таблица 1

Материал	$T_{\max}$	$T_{\min}$	режим
X18H9	650	150	а—е
ЭИ-654	600	200	а, в, г
	700	200	в
15X2МФА	500	100	а, в, г
P2M	500	100	а, в, г
22К	300	100	а, в, г

чтобы обеспечить накопление односторонних деформаций в сторону растяжения задавался коэффициент асимметрии  $R_{\sigma} = -0,8$ . Длительность цикла активного нагружения во всех случаях составляла около 2 мин.

С целью определения характеристик изотермической и неизотермической располагаемой пластичности были проведены испытания на длительную прочность (пластичность) и длительный статический разрыв, при этом во время испытаний поддерживалось соответственно  $\sigma = \text{const}$  или  $\epsilon = \text{const}$ , в неизотермических испытаниях температура изменялась по линейному циклу рис. 1, к=л. Из этих испытаний

определялось относительное сужение сечения образца в зависимости от времени до разрушения. Величина располагаемой пластичности определялась затем по формуле  $\varepsilon_f = \frac{1}{1-\psi}$ , где  $\psi$  — относительное сужение сечения.

Было получено, что кратковременная пластичность стали X18H9 в исследованном диапазоне температур находится на уровне  $60 \div 65\%$ , с

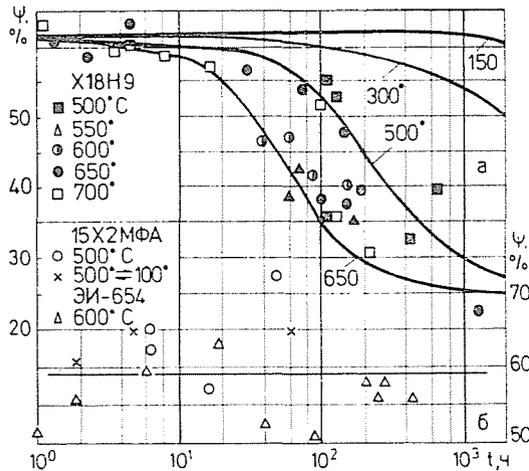


Рис. 2. Зависимость относительного сужения образцов сталей X18H9 (а), 15X2MФА и ЭИ-654 (б) от времени до разрушения

увеличением времени до разрушения материал охрупчивается, причем наиболее интенсивно при высоких температурах и величина пластичности снижается до  $20 \div 25\%$ , рис. 2. Для данного материала зависимость относительного сужения сечения образца от температуры испытания и времени до разрушения можно представить в виде единой параметрической кривой  $\psi(P)$ , где  $P = T(c + \lg t)$  — параметр Ларсена—Миллера (рис. 3). Если предположить, что качественных изменений в характере остаривания при переменной температуре не происходит, то для заданного момента времени и известного закона изменения температуры в цикле величину параметра  $P$  можно определить линейным суммированием задавая приращения  $\Delta t$  и считая, что на каждом из участков разбиения временного интервала процесс происходит при фиксированной температуре. Величину относительного сужения можно затем вычислить, пользуясь зависимостью  $\psi(P)$ . По указанной схеме на ЭВМ были обчислены результаты испытаний на растяжение, проводив-

шихся по режиму рис. 1, к. В расчете принималось  $\Delta t = 12$  сек, длительность температурного цикла  $150 \rightleftharpoons 650^\circ$  — 2 мин, времена испытаний составляли до 100 час. Соответствие экспериментальных значений  $\psi$  с расчетными получено удовлетворительное (рис. 3). Использование в описанной процедуре параметрического представления не является обязательными, могут быть получены непосредственно зависимости  $\psi(t)$  для требуемых интервалов температур, при этом естественно увеличится количество исходных экспериментальных данных, необходимых для расчета.

Стали ЭИ-654, 15Х2МФА и Р2М в исследованных диапазонах температур, а также при неизотермическом нагружении имеют характеристики пластичности соответственно на уровне  $60 \div 65$  и  $80\%$ , которые сохраняются практически стабильными независимо от длительности испытаний (рис. 2, табл.2).

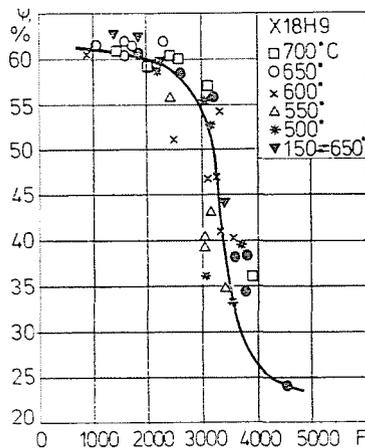


Рис. 3. Параметрическое представление относительного сужения для стали X18H9

Сталь 22К является деформационно стареющей, причем наиболее интенсивно в районе  $270^\circ\text{C}$ . Для данного материала процессы старения протекают достаточно быстро за времена порядка 10 мин (3, 4), в связи с чем в расчете целесообразно использовать характеристики остаренного материала, табл. 2. Испытания, выполненные в условиях жесткого режима нагружения показали, что число циклов до разрушения (образования трещины) в общем случае зависит от фазы изменения деформации и температуры в цикле. Если максимум температуры достигается в полупереме растяжения, а минимум — в полупереме сжатия (синфазный режим), то для ряда материалов наблюдается существенное снижение

Таблица 2

$T^{\circ}$	100	200	300	400	500
15X2MФА	65	64	64	62	62
P2M	74	76	76	79	79
22K	50	38	30	46	50

долговечности. Так при испытаниях стали X18H9 по режиму  $650 \rightleftharpoons 150^{\circ}$ , рис. 1, в, долговечность снижается до 4—5 раз, для стали ЭИ-654, режим  $600 \rightleftharpoons 200^{\circ}$  — до 2-х раз, а с повышением максимальной температуры (режим  $700 \rightleftharpoons 200^{\circ}$ ) — до 5—6 раз; для P2M, режим  $500 \rightleftharpoons 100^{\circ}$  — до 2-х раз, рис. 4, а, б. Характерно, что снижение долговечности может наблюдаться как у циклически стабилизирующихся, так и у упрочняющихся и разупрочняющихся материалов, независимо от изменения предельной пластичности во времени. В то же время, материалы 15X2MФА (режим  $500 \rightleftharpoons 100^{\circ}$ ) и 22K (режим  $300 \rightleftharpoons 100^{\circ}$ ) снижения долговечности при синфазном нагружении практически не проявили.

Для исследования влияния уровня максимальной температуры на снижение долговечности сталей X18H9 и ЭИ-654 при синфазном нагружении были проведены дополнительные испытания, в которых при

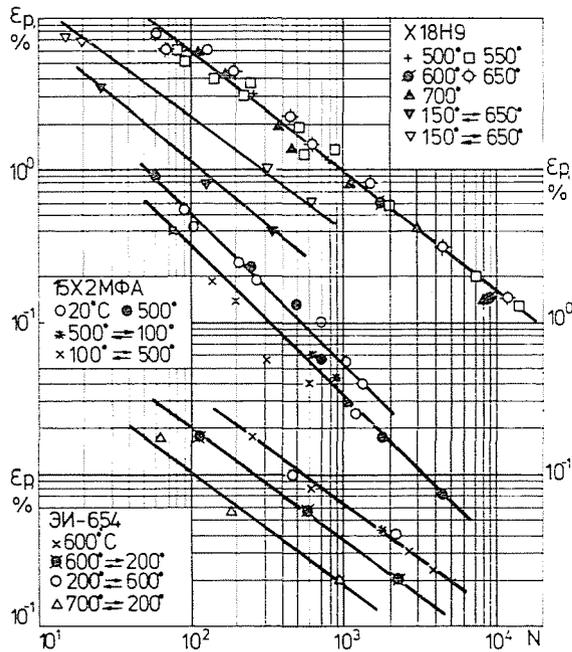


Рис. 4/а

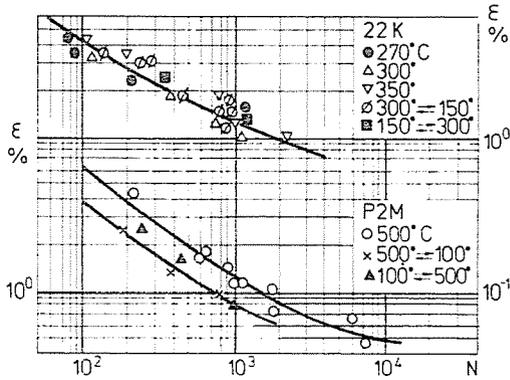


Рис. 4. Кривые усталости сталей X18N9, 15X2MФА, ЭИ-654 (а) 22К и P2M (б) при жестком режиме нагружения

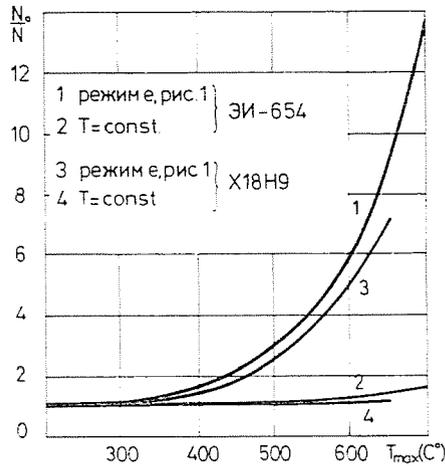


Рис. 5. Влияние уровня температуры  $T_{\max}$  при синфазном неизотермическом и изотермическом нагружении на относительное снижение долговечности сталей ЭИ-654 и X18N9

постоянной амплитуде и  $T_{\max} = \text{const}$  варьировалось значение  $T_{\max}$ . Результаты этих испытаний представлены на рис. 5. Так же для данных сталей показано влияние уровня температуры на долговечность при изотермических испытаниях. Как видно из рис. 5 в неизотермических испытаниях с ростом  $T_{\max}$  наблюдается ярко выраженное закономерное снижение долговечности, в то время как при изотермических испытаниях уровень температуры слабо влияет на величину долговечности. Все фактические значения долговечности на рис. 5 отнесены к величине  $N_0$  —

числу циклов до разрушения в изотермических испытаниях при  $T = T_{\min} = \text{const}$ .

При противофазном нагружении для всех материалов были получены результаты, практически накладывающиеся на кривые малоцикло-вой изотермической усталости, соответствующие максимальной температуре цикла — режимы  $150 \rightleftharpoons 650^\circ$  — сталь Х18Н9,  $200 \rightleftharpoons 600^\circ$  — ЭИ-654,  $100 \rightleftharpoons 500^\circ$  — 15Х2МФА,  $100 \rightleftharpoons 500^\circ$  — Р2М и  $100 \rightleftharpoons 300^\circ$  — 22К, рис. 4.

Возможность линейного суммирования усталостного и квазистатистического повреждений может быть, например, исследована по результатам испытаний при мягком режиме нагружения, когда предельное состояние достигается в результате взаимодействия указанных типов повреждений.

Ход кривых малоцикло-вой усталости, полученных при мягком неизотермическом и изотермическом нагружении, рис. 6, обусловлен кинетикой односторонних и циклических необратимых деформаций и соответственно темпом накопления квазистатического и усталостного повреждений. Данные процессы, в свою очередь, определяются реализуемой комбинацией циклов нагружения и нагрева, уровнем температур, а также асимметрией цикла напряжений.

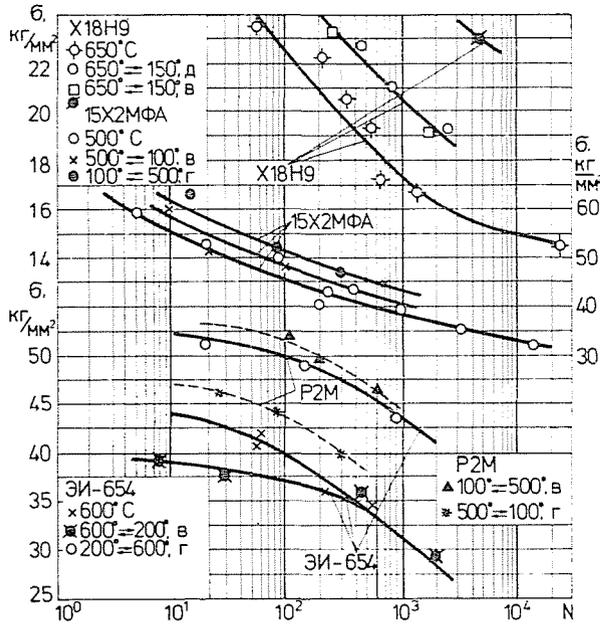


Рис. 6. Кривые усталости сталей Х18Н9, 15Х2МФА, Р2М и ЭИ-654 при мягком нагружении

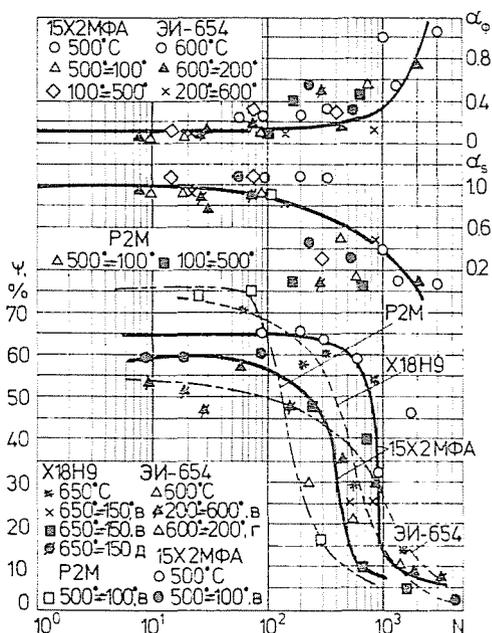


Рис. 7. Характер изменения относительного сужения сечения (а) и величины усталостного и квазистатического повреждений (б) при мягком режиме нагружения

уменьшением амплитуды напряжений и ростом числа циклов до разрушения характерным является переход от квазистатического разрушения к усталостному. При этом относительное сужение сечения образца, характеризующее долю квазистатического повреждения, изменяется от величины, близкой к сужению при длительных статических испытаниях до весьма малых значений, составляющих доли процента (рис. 7). При  $N > 100$  разрушение носит усталостный характер.

Особенностью использования деформационно-кинетического критерия разрушения при неизотермическом нагружении является то, что величина усталостного повреждения, рассчитываемого по зависимости (1), определяется по кривой усталости соответствующей заданной комбинации циклов нагружения и нагрева, а квазистатическое повреждение определяется также с учетом зависимости располагаемой пластичности от формы цикла нагрева. С учетом этих особенностей для исследованных материалов были подсчитаны усталостные и квазистатические повреждения. Кинетика данных повреждений с числом циклов до разрушения показана на рис. 7. Как следует из этого рисунка, для исследованных материалов, обладающих контрастными механическими

Таблица 3

№ образца	Материал	Температура °С	Долговечность циклы	Накопление повреждений		
				квaziста- тичeские ( $d_s$ )	усталост- ные ( $d_v$ )	суммарные
1	2	3	4	5	6	7
1	15X2MФА	500	90	1,12	0,23	1,35
2	15X2MФА	500	200	1,12	0,22	1,34
3	15X2MФА	500	339	1,08	0,38	1,46
4	15X2MФА	500	989	0,38	1,02	1,40
5	15X2MФА	500	2900	0,08	1,03	1,11
6	15X2MФА	500±100	9	0,95	0,06	1,01
7	15X2MФА	500±100	18	0,92	0,07	0,99
8	15X2MФА	500±100	91	0,95	0,15	1,10
9	15X2MФА	500±100	672	0,10	0,55	0,65
10	15X2MФА	100±500	15	1,09	1,163	1,25
11	15X2MФА	100±500	80	1,13	0,37	1,50
12	15X2MФА	100±500	302	0,35	0,38	0,73
1	P2M	500±1000	25	0,9	0,09	0,99
2	P2M	500±1000	76	0,92	0,19	1,11
3	P2M	500±1000	290	0,11	0,51	0,62
4	P2M	100±500	175	0,12	0,41	0,53
5	P2M	100±500	645	0,06	0,47	0,53
6	P2M	100±500	100	0,91	0,09	1,00
1	ЭИ-654	600	57	1,06	0,24	1,30
2	ЭИ-654	600	558	0,31	0,38	0,69
3	ЭИ-654	600	225	0,44	0,58	1,02
4	ЭИ-654	600	1450	0,135	0,465	0,60
5	ЭИ-654	600±200	8	0,97	0,08	1,05
6	ЭИ-654	600±200	29	0,82	0,15	0,97
7	ЭИ-654	600±200	450	0,545	0,15	0,70
8	ЭИ-654	600±200	1950	0,1	0,72	0,82
9	ЭИ-654	200±600	19	0,906	0,06	0,91
10	ЭИ-654	200±600	151	0,83	0,07	0,90
11	ЭИ-654	200±600	870	0,44	0,13	0,57
1	X18H9	650	55	1,28	0,05	1,33
2	X18H9	650	210	0,85	0,42	1,27
3	X18H9	650	315	1,22	0,21	1,43
4	X18H9	650	580	0,18	0,52	0,7
5	X18H9	650	690	0,37	0,68	1,05
6	X18H9	650	1420	0,39	0,31	0,7
7	X18H9	650±150	170	0,5	0,3	0,8
8	X18H9	650±150	240	0,75	0,1	0,85
9	X18H9	650±150	780	0,6	0,15	0,75
10	X18H9	650±150	1800	0,11	0,7	0,88
11	X18H9	650±250	480	0,38	0,15	0,53
12	X18H9	650±150	820	0,35	0,17	0,52
13	X18H9	650±150	2550	0,28	0,56	0,84
14	X18H9	150±650	4500	0,5	0,17	0,67

свойствами, изменение величины повреждений с числом циклов носит сходственный характер при всех рассмотренных режимах нагружения.

Суммарное повреждение (табл. 3), вычисленное с использованием соотношения (1), находится в интервале от 0,5 до 1,5, что соответствует рассеянию по долговечности в  $\pm 1,5$  раза и не превосходит пределов разброса исходных характеристик материала, полученных в базовых экспериментах.

### Резюме

В настоящей работе приводятся результаты исследования условий разрушения при малоцикловом неізотермическом нагружении ряда конструкционных материалов — сталей X18H9, ЭИ-654, 15X2 МФА, P2M и 22К, характеризующихся контрастными статическими и циклическими свойствами.

Для исследованных материалов были подсчитаны усталостные и квазистатические повреждения.

Показано, что характер накопления усталостных и квазистатических повреждений в значительной степени обусловлен реализуемой комбинацией циклов нагружения и нагрева, диапазоном изменения температуры, а также механическими свойствами каждого конкретного типа материала, определяющими поцикловое изменение необратимых деформаций.

### Литература

1. Гусенков, А. П.—Казанцев, А. Г.: Метод исследования закономерностей деформирования и критериев разрушения при малоцикловом неізотермическом нагружении. Заводская лаборатория, 1977, № 11.
2. Казанцев, А. Г.—Черных, А. Н.: Метод испытаний на малоцикловую прочность при программном неізотермическом нагружении. Заводская лаборатория, 1981, № 10.
3. Структурные факторы малоциклового разрушения металлов. М., Наука, 1977.
4. Гусенков, А. П.—Казанцев, А. Г.: Прочность при малоцикловом и длительном циклическом деформировании в связи с формой циклов нагружения и нагрева. Машиноведение, № 3, 1979.
5. Туляков, Г. А.: Термическая усталость в теплоэнергетике. М., Машиностроение, 1978.

А. П. ГУСЕНКОВ  
А. Г. КАЗАНЦЕВ  
А. Н. ЧЕРНЫХ

ИМАШ АН СССР

dr. János GINSZTLER H-1521 Budapest