

ЗАКОНОМЕРНОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ РАЗРУШЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ МАЛОЦИКЛОВОМ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

ГУСЕНКОВ А. П*, КОТОВ П. И.*, ГИНСТЛЕР Я.**

Поступило 17 апреля 1987 г.

Представлено проф. др. И. Артингер

Abstract

An urgent problem for thermal power plants is to predict the remaining life of steam pipes and boiler tubes. Results of low cycle fatigue and thermal fatigue experiments of different steel types are discussed and analyzed.

Важным элементом исследований в комплексе задач обеспечения малоциклового прочностного элемента конструкций является изучение условий разрушения и критериев усталости при неизотермическом нагружении.

Авторами выполнена программа изучения малоциклового прочностного жаропрочных деформируемых: *A*(ЭИ-693ВД), *B*(ЭП-220), *C*(ВЖ-98) и литейного *D*(ВЖЛ-12У) сплавов в широком диапазоне постоянных (до 1000 °С) и переменных температур (200...800 °С, 200...930 °С, 200...800 °С и 200...1000 °С — соответственно для материалов *A*, *B*, *C* и *D*) при различных режимах изотермического и неизотермического (I — изотермический, II, III, IV — неизотермические, противофазный, синфазный и термоусталостный режимы соответственно, рис. 1) малоциклового нагружения по методике [1, 2]. Существенно, что исследуемые сплавы являются контрастными по прочностным и деформативным свойствам: *A* и *C* — высокопластичные ($\psi = 60\%$), *B* — средней пластичности ($\psi = 14\%$) и *D* — малопластичный ($\psi = 4 \div 5\%$) и представительными с точки зрения выявления общих закономерностей высокотемпературной малоциклового усталости. Характерно, что для сплавов *A*, *B* и *C* в связи с присущей им структурной нестабильностью наблюдается снижение деформационной способности в процессе высокотемпературного длительного деформирования («охрупчивание»), причем зависимость $\psi(T)$ может иметь минимум («провал») пластичности, приход-

* ИМАШ АН СССР

** Будапештский Политехнический Университет

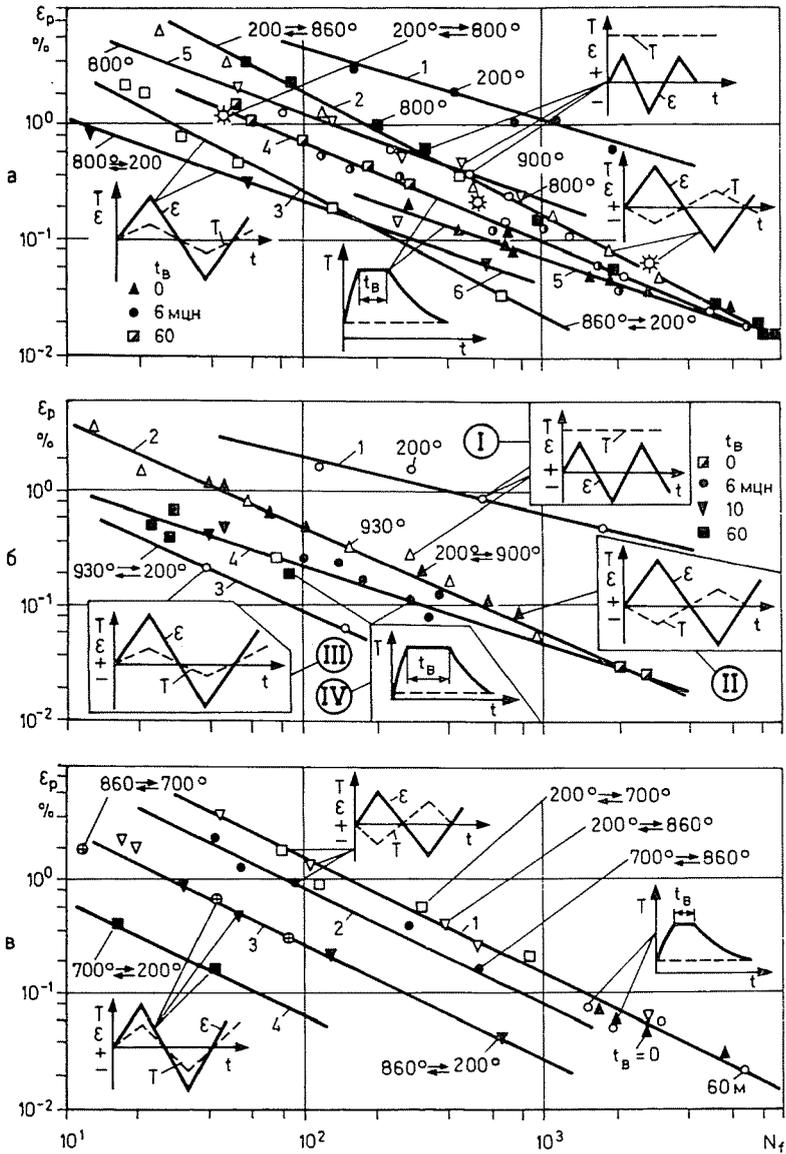


Рис. 1. Режимы изотермических и неизотермических нагружений

ящийся на узкий диапазон температур деформационного старения: [1—3]. Напротив, у сплава Д при высоких температурах (до 1000°C) имеет место явное увеличение (рис. 2) длительной пластичности, характерное для структурно стабильных материалов [4].

На основе анализа полученных закономерностей (рис. 1, 2) установлено, что процесс формирования предельного состояния по условиям

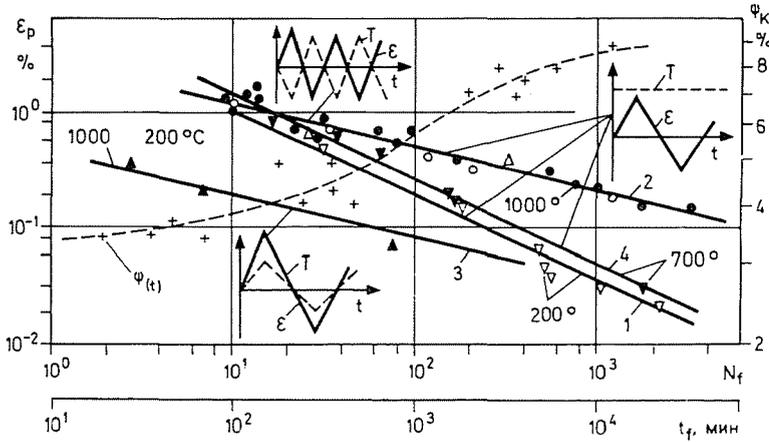


Рис. 2. Зависимость ε_p и ψ_k от N_f и t_f

прочности при малоцикловом неизотермическом нагружении, тип и уровень предельных малоцикловых повреждений, развивающихся в условиях повторных термомеханических воздействий, определяется величиной температур, формой и сочетанием силового цикла и цикла нагрева, а также деформационной способностью материала и ее изменением во времени [2].

Для 1-го режима нагружения весьма заметно влияние уровня температуры на сопротивление разрушению. Повышение температуры от 200 °С до 860 °С для сплава *A* и от 200 °С для сплава *B* (кривые 1, 2 — рис. 1, а и 1, б) вызывает снижение долговечности и на уровне $\varepsilon_p \approx 1,0\%$ оно достигает порядка и более по числу циклов до разрушения. Для сплава *D*, напротив, долговечность при 1000 °С выше, чем при 200 °С или 700 °С (кривые 1, 2, 3 — рис. 2) и тем в большей степени, чем меньше значение ε_p , что определяется характером изменения зависимости $\psi(t)$ при больших временах деформирования.

Эффект наибольшего повреждения выявлен для неизотермического режима III, когда полцикл растяжения осуществляется при высоких температурах цикла. Сравнение кривых 2, 3 для сплавов *A*, *B* и *D* (рис. 1 и рис. 2 соответственно), а также кривых 5 и 6 для сплава *C* (рис. 1/а) показывает, что при переходе от режима III к режиму I (при значении T_{\max} соответствующем режиму III) долговечность изменяется от одного (сплавы *A* и *C*) до двух (сплавы *B* и *D*) порядков.

Обнаружен факт близкого (сплав *C*, рис. 1/а) или полного (сплавы *A*, *B*, *D*) совпадения данных неизотермических (по режиму II, для циклов нагрева 800 \rightleftharpoons 200 °С, 860 \rightleftharpoons 200 °С, 930 \rightleftharpoons 200 °С и 1000 \rightleftharpoons 200 °С соответст-

венно для указанных сплавов и изотермических (по режиму I) малоцикловых испытаний. При этом в изотермических испытаниях (по режиму I) температура была равна максимальной в неизотермическом режиме II, т. е. составляла 800°, 860°, 930° и 1000 °С соответственно. Реализующееся согласование данных, полученных в разных диапазонах изменения температуры, указывает на то, что уровень пластичности не сказывается существенно на проявление отмеченного выше эффекта.

Выявлена четкая корреляция между малоцикловой долговечностью и пластичностью. К примеру, для изотермических режимов сопротивление малоцикловому разрушению сплавов *A* и *C* в 4—5 раз выше по числу циклов, чем у сплавов *B* и *D* (кривые 1, 2, 5 на рис. 1/а и кривые 1, 2 на рис. 1/б); наименьшая долговечность в сопоставимых условиях (кривые 1, 2 на рис. 1/а и рис. 2) наблюдается у малопластичного сплава *D*.

Существенно, что снижение пластичности за счет влияния процессов деформационного старения вызывает усиление повреждающего эффекта как в синфазном (II), так и в противофазном (III) режимах неизотермического нагружения. Характерными в этом отношении являются данные по сплаву *A* (рис. 1/в), имеющему специфическую зависимость располагаемой пластичности $\psi(T, t)$ и контрастные деформативные свойства в диапазонах температур 200...700 °С и 700...860 °С, но примерно одинаковое значение пластичности при 200° и 860 °С. Сравнение кривых 3 и 4 для режимов 700° \rightleftharpoons 200 °С и 860° \rightleftharpoons 700 °С соответственно показывает, что «охрупчивание» сплава при 700 °С приводит к существенному (в 5÷10 раз) снижению малоцикловой долговечности по сравнению с долговечностью для режима I (кривая I), хотя за счет процессов «залечивания» при 860 °С указанный эффект для второго случая выражен слабее. Для двух режимов типа III 700° \rightleftharpoons 760 °С и 200° \rightleftharpoons 700 °С наведенные в полуцикле растяжения первого режима более значительные повреждения (700 °С) чем аналогичные повреждения во втором режиме (200 °С) не успевают «залечиться», хотя условия для протекания процесса восстановления в I-ом случае более благоприятны (860 °С).

Для режима IV характер накопления предельных малоцикловых повреждений и тип разрушения обусловлены реализующимися (в силу специфики нагружения) нестационарностью циклического упругопластического деформирования и процессом накопления с числом циклов односторонней деформации перед разрушением ψ_i (табл. I), уровень которой зависит от длительности выдержки t_b при T_{\max} , жесткости нагружения [I], и может достигать значений, близких получаемым в условиях статического однократного разрыва. Наличие высокого уровня квазистатических повреждений определяет для режима IV, сходственного по сочетанию циклов деформации и температуры с режимом

III, эффект снижения долговечности (кривые 4, 5 — рис. 1/а и кривая 4 — рис. 1/б) по сравнению с аналогичными данными для режимов I и III. Характерно, что при долговечностях, когда уровень статических повреждений мал, имеет место совпадение (кривая I рис. 1/в) данных, получаемых в сходственных условиях.

Таблица I

Циклы		2 · 10	8 · 10	2 · 10 ²	6 · 10 ²	1 · 10 ³	2 · 10 ³	3,5 · 10 ³	4 · 10 ³	1 · 10 ⁴	
СПЛАВ	А	ψ	—	44	34	13	8	4	—	2,2	1,2
	Б	°	16,4	12	9,2	3,4	2,0	1,2	1,0	—	—

Таким образом, выполненный анализ показывает, что при малоцикловом неизотермическом нагружении процесс формирования предельного состояния в общем случае протекает с выраженной кинетикой за счет проявления деформативных свойств материала, временных эффектов, а также явлений накопления односторонних деформаций.

Для описания условий достижения предельного состояния при малоцикловом неизотермическом нагружении перспективной оказывается деформационно-кинетическая трактовка [1—4] суммирования усталостных

$$d_f = \int_1^{N_f} dN/N_{if}(\varepsilon^{(k)}, t, T_{var}) \quad (1)$$

и квазистатических

$$d_s = \int_0^{\varepsilon_f} d\varepsilon^{(k)}/\varepsilon_f(t, T_{var}) \quad (2)$$

повреждений в линейной форме:

$$d_f + d_s = 1, \quad (3)$$

обеспечивающая расчетную оценку малоцикловой долговечности конструктивных элементов [1] с учетом возможного изменения по циклам и во времени циклических $\varepsilon^{(k)} = f_1(t)$ и односторонне накопленных $e^{(k)} = f_2(t)$ деформаций, достигнутой к моменту разрушения величины последней ε_f , а также трансформации во времени сопротивления разрушению $N_{if}(\varepsilon^{(k)}, t, T_{var})$ и деформационной способности $\varepsilon_f(t, T_{var})$ материала.

Для выполнения расчетной процедуры по уравнениям (1)—(3) при различных сочетаниях режимов нагружения и нагрева наряду с информацией о деформационных процессах, протекающих в опасной зоне конструктивного элемента, необходима система базовых характеристик,

отражающих сопротивление циклическому деформированию и разрушению применяемого материала.

В качестве базовых расчетных характеристик следует принять кривые малоциклового усталости $N_{if} = f(\epsilon^{(k)}, t, T_{var})$ при жестком режиме деформирования и кривые длительной пластичности $\epsilon_f = f(t, T_{var})$. Кривые малоциклового усталости следует получать при длительном изотермическом и неизотермическом малоцикловом жестком нагружении с учетом уровня температур (рис. 3/а), частоты (времени) деформирования (рис. 3/б), а также цикличности изменения температуры (рис. 3/в).

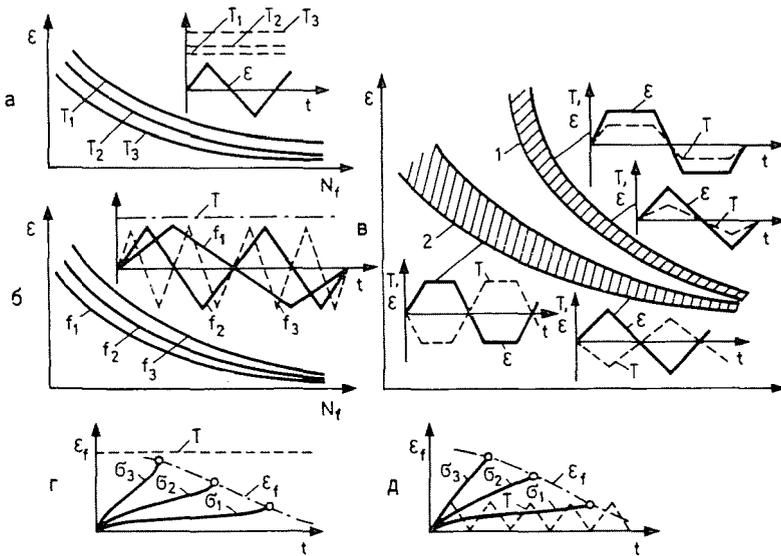


Рис. 3. Кривые малоциклового усталости

В случае режимов, обладающих максимальным повреждающим эффектом, кривые 2 (рис. 3/в) жесткого режима деформирования смещаются по сравнению с кривыми 1, в область меньшего числа циклов до разрушения и отражают влияние знака напряжений при высокотемпературной выдержке и роль фазности циклов нагрева и нагрузки.

Основными видами испытаний на неизотермическую малоцикловую усталость являются осевое растяжение-сжатие, основным типом нагружения — жесткое. Информация о располагаемой пластичности может быть получена при монотонном растяжении (рис. 3/г) с учетом скорости деформирования, либо при длительном статическом нагружении (рис. 3/д). Последняя характеристика должна получаться при циклически меняющихся температурах, реализующихся в реальном

режиме термомеханического нагружения опасной зоны конструктивного элемента.

В ряде случаев, где наблюдается факт соответствия сопротивления разрушению материалов при изотермическом и неизотермическом нагружениях в качестве базовых характеристик могут быть приняты изотермические кривые малоциклового усталости и длительной пластичности при температурах, соответствующих максимальной при неизотермическом режиме нагружения.

Для получения комплекса базовых данных должна быть реализована система базовых испытаний, в которых обеспечиваются:

- постоянство от цикла к циклу заданных максимальных нагрузок (деформаций) и температур в течение всего процесса испытания;
- заданный закон изменения нагрузок (деформаций), в том числе линейный, с выдержками, при различной асимметрии цикла и изменения знака нагрузки (деформации);
- синхронизированность режимов нагружения (деформирования) и нагрева (охлаждения) по заданной программе;
- статическое нагружение с варьируемыми скоростями деформирования и испытания на ползучесть в условиях заданного циклического изменения температуры;
- диапазон частот нагружения (деформирования), позволяющий исследовать эффекты длительного нагружения (охрупчивания материала, ползучесть и т. п.) и кратковременное циклическое нагружение, при котором указанные временные эффекты еще не проявляются.

Полученный на основании разработанной методологии формирования базовых характеристик комплекс расчетных базовых данных по сплавам *A*, *B*, *C* и *D* использовался для расчета компонент предельного повреждения в условиях термоусталостного нагружения IV: d_s — по кривой располагаемой пластичности, полученной в условиях ползучести при $T = T_{\max}$ [3], d_f — по кривым малоциклового усталости (кривые 2, рис. 1/аб), полученных в сходственных условиях (по жесткому режиму III).

Результаты динейной операции по вычислению суммарного предельного повреждения $d = d_f + d_s$ для контрастных по деформативным свойствам сплавов *A* и *B* дает значение в пределах 0,6—1,4 (рис. 4), что соответствует весьма малому (не более $\pm 1,5$ раза) рассеянию рассчитываемых долговечностей конструктивного элемента и подтверждает справедливость предлагаемых трактовок в форме (1—3) для неизотермического режима малоциклового нагружения и методологии формирования базовых расчетных характеристик.

Эти результаты значительно облегчают оценку остаточного ресурса энергетических трубопроводов.

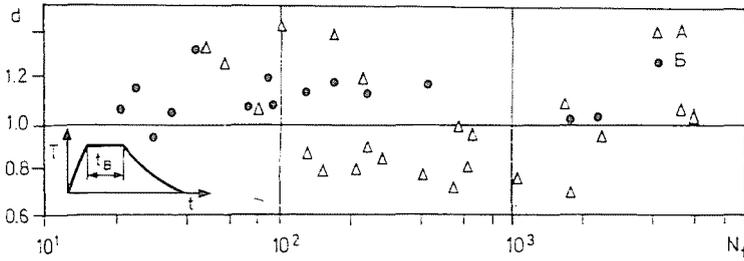


Рис. 4. Зависимость предельного повреждения от N_f

Используя ранее полученные эксплуатационные данные и результаты статических, динамических и усталостных испытаний, проведенных при различных температурах, а также электронномикроскопических исследований материалов энергетических трубопроводов в их исходных состояниях и после различных сроков службы; удается определить предельный уровень повреждений, до которого еще возможно восстановление с хорошим практическим приближением исходных характеристик материала [5, 6].

Для большинства машин и конструкций в связи с повторяемостью нагружения с относительно большими неупругими деформациями (около 0,5...1%) при ограниченном числе циклов (до 10^4) развиваются длительное статическое и усталостное повреждения. Поэтому задача прогнозирования прочности и ресурса элементов таких машин и конструкций предопределяет необходимость исследования процессов малоциклового деформирования с анализом накопления как длительных статических, так и малоциклового усталостных повреждений в их взаимодействии. Традиционные методы расчета статической и длительной статической прочности, основанные на оценке номинальных напряжений, оказываются недостаточными.

Например, в результате неизотермической малоциклового усталости происходили разрушения барабанов котлов в зоне водовпускных отверстий, стопорных клапанов турбин, сварных соединений на коллекторах и трубопроводах, коленах труб паропроводов.

В настоящее время накоплено большое количество экспериментальных данных по термической малоциклового усталости, испытания остаются достаточно распространенными. Вместе с тем термоусталостной методике свойственны особенности, связанные прежде всего с непостоянством от цикла к циклу и напряжений, и деформаций при заданном температурном режиме испытаний. При этом в ряде случаев не учитывается кинетика циклических и односторонних деформаций, что не позволяет правильно интерпретировать получаемые данные. Этому вопросу в этом исследовании уделено значительное внимание.

Резюме

В настоящей работе приводятся результаты исследования программы изучения малоциклового прочностного жаропрочных деформируемых: А(ЭИ-693ВД), В(ЭП-220), С(ВЖ-98) и литейного Д(ВЖЛ-12У) сплавов в широком диапазоне постоянных (до 1000 °С) и переменных температур (200...800 °С, 200...930 °С, 200...800 °С и 200...1000 °С) для различных типов материалов.

Полученные результаты облегчают оценку остаточного ресурса энергетических трубопроводов.

Литература

1. Гусенков А. П., Котов П. И.: Малоцикловая усталость при неизотермическом нагружении. — М.: Машиностроение, 240 (1983).
2. Котов П. И., Гусенков А. П.: Закономерности разрушения жаропрочных сплавов при малоцикловом неизотермическом нагружении. — *Машиноведение*, 3, 68—76 (1981).
3. Гусенков А. П., Котов П. И.: Прочность при длительном малоцикловом и неизотермическом нагружении. — В кн.: Сборник докладов 8-го Конгресса по испытанию материалов. — Будапешт (сентябрь—октябрь), 11, 609—615 (1982).
4. Казанцев А. Г.: Закономерности малоциклового разрушения при неизотермическом и сложном нагружении. — В кн.: Малоцикловая прочность — механика разрушения, живучесть и материалоемкость конструкций: Тезисы докладов. — М.: И, 86—89 (1983).
5. Гинстлер Я., Хаваш И.: Опыты и перспективы определения остаточного ресурса энергетических трубопроводов. Нормирование прочности и ресурса высоконагруженных машин. Тезисы докладов Всесоюзного научно-технического симпозиума с участием специалистов стран-членов СЭВ Владимир, 18—20 ноября 1986 года. Изд. Инст. машиноведения, Москва, 38 (1986).
6. Геминев В. Н., Иванова В. С., Фридман З. Г.: Экспресс прогнозирование жаропрочности на основе принципов термоактивационного анализа и оценка остаточного ресурса деталей после МТО и наработки. *Проблемы прочности*, 12, 53—59 (1985).

А. П. ГУСЕНКОВ, проф., д. т. н. } ИМАШ АН СССР, Москва
П. И. КОТОВ, к. т. н. } 101830, ул. Грибоедова, 4.

Dr. János GINSZTLER H-1521 Budapest