

УДК 621.539.43.001.24

ПРОБЛЕМЫ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ В МЕХАНИКЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ НА СТАДИИ ОБРАЗОВАНИЯ ТРЕЩИН (часть 1)

© Александр Никитович Романов

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения
им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия*

www.imash.ru

***Аннотация.** Рассматриваются некоторые закономерности циклического деформирования конструкционных поликристаллических материалов в широком диапазоне положительных температур, которые целесообразно использовать при моделировании процессов механики деформирования и разрушения в условиях усталостного нагружения.*

Введение. Исследование закономерностей развития разрушения на различных стадиях циклического деформирования и описание предельных состояний на основе использования критериев линейной и нелинейной механики деформирования и разрушения, а также на использовании феноменологических подходов, основанных на экспериментальных данных, является важной фундаментальной научной и практической проблемой. Выявляемые закономерности должны быть положены в основу разработки методов расчетов на прочность и непременно учитываться при математическом моделировании (в том числе при создании структурных моделей) процессов деформирования и разрушения конструкционных материалов в заданных условиях нагружения.

Ниже приводятся экспериментально выявленные автором основные закономерности и особенности циклического деформирования и разрушения, а также структурных изменений при этом различных конструкционных материалов в широком диапазоне температур и долговечностей на стадии образования трещин.

1. Сопротивление деформированию и разрушению конструкционных металлических материалов.

Расчет предельных состояний (образование трещины) элементов конструкций осуществляется на основе использования экспериментальных данных о сопротивлении материалов циклическому деформированию и разрушению. Для описания условий разрушения разрабатываются критерии разрушения, описывающие общие закономерности разрушения.

1.1. Сопротивление деформированию и разрушению при нормальных и высоких температурах.

Конструкционные металлические материалы, испытывающие переменные нагрузки в процессе эксплуатации, в зависимости от структурного состояния и действующей температуры могут либо упрочняться (ширина петли гистерезиса при мягком нагружении - нагружение с заданной нагрузкой в циклах - уменьшается, при жестком нагружении - нагружение с заданным перемещением в циклах - напряжение с ростом числа циклов увеличивается), либо разупрочняться (при мягком нагружении ширина петли гистерезиса возрастает с ростом числа циклов нагружения, а при жестком нагружении рост числа циклов нагружения сопровождается падением напряжения в циклах), либо оставаться

стабильными, демонстрируя постоянство параметров деформирования (ширины петли гистерезиса или напряжения в циклах) в течение всего срока эксплуатации. В соответствии с этим материалы подразделяются на циклически упрочняющиеся, разупрочняющиеся и стабильные.

Как было показано ранее [1-4], тип материала (упрочняющийся, разупрочняющийся или циклически стабильный) может быть определен по кривым статического растяжения (рис.1).

Если об упрочнении или разупрочнении судить по изменению условных напряжений, величина которых зависит от истинного сечения образца, то для циклически упрочняющихся материалов при статическом нагружении практически до момента разрушения наблюдается рост условных напряжений (кривая 1 на рис.1, а), т.е упрочнение материала за счет пластической деформации протекает более интенсивно, чем разупрочнение за счет уменьшения сечения. У разупрочняющихся материалов большая доля накопления деформаций ($\epsilon_b < 0,5\epsilon_{обш.}$, где ϵ_b - деформация, соответствующая пределу прочности σ_b) при статическом нагружении сопровождается падением условных напряжений (кривая 2 на рис.1,а).

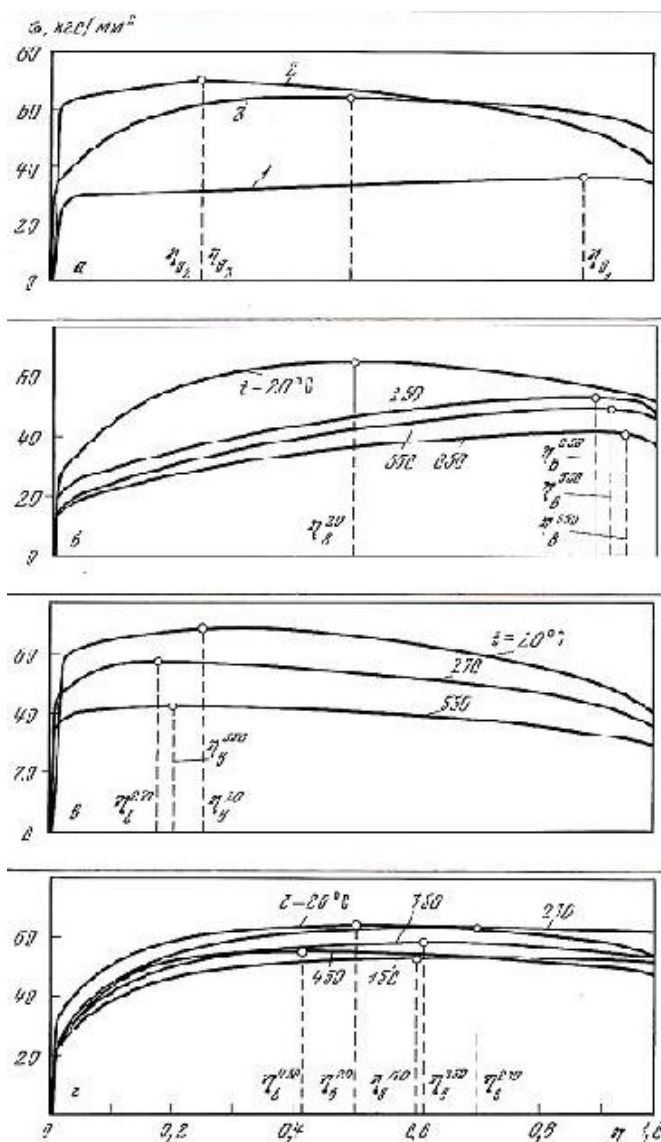


Рис.1. Кривые статического растяжения при 20⁰С (а: 1 - АД-33, 2 - сталь ТС, 3 - сталь 22к) и в диапазоне температур сталей X18Н10Т (б), ТС (в), 22к (г).

Для циклически стабилизирующегося материала (кривая 3 на рис.1,а) имеют место практически равные участки упрочнения (роста напряжений) и разупрочнения (падения напряжений), т.е. ($\varepsilon_b = 0,5 \varepsilon_{\text{общ.}}$). Причем, как и при циклическом деформировании, начальная стадия статического растяжения у всех типов материалов характеризуется упрочнением (ростом напряжений до σ_b).

Температурные условия нагружения, как правило, изменяют характер поведения материала. По кривым статического растяжения при повышенных температурах можно также определить, склонен ли материал к деформационному старению и как велика интенсивность его проявления.

При температуре интенсивного протекания деформационного старения наблюдается непропорциональное снижение предела пропорциональности и предела прочности по сравнению с их значениями при комнатной температуре.

Таким образом, длительность стадий циклического упрочнения, разупрочнения и стабилизации для металлических материалов может быть оценена по кривым статического растяжения, представленных в координатах «условное напряжение (или нагрузка) - статическое повреждение $\eta = \varepsilon/\varepsilon_{\text{общ.}}$ ». При этом длительность стадии упрочнения характеризуется величиной $\eta_b = \varepsilon/\varepsilon_{\text{общ.}}$. Для упрочняющихся материалов $\eta_b > 0,5$, для разупрочняющихся $\eta_b < 0,5$ и для циклически стабилизирующихся $\eta_b \cong 0,5$.

Характер поведения материала определяет темп накопления повреждений.

Один и тот же материал в зависимости от структурного состояния (термообработки) может быть упрочняющимся (например, после отжига), разупрочняющимся (например, после закалки с низким отпускком) и циклически стабильным.

При высоких температурах существенным фактором, сопровождающим процесс деформирования и оказывающим влияние на изменение механических свойств материала, а связи с этим и на кинетику деформационных характеристик, является структурное изменение материала: деформационное старение, собирательная рекристаллизация, полигонизация, а также проявление их реологических свойств (ползучесть, релаксация), интенсивность протекания которых зависит от уровня нагрузки, температуры и времени.

1.2. Обобщенные диаграммы циклического упругопластического деформирования металлических материалов

Чтобы определить напряженно-деформированное состояние элементов конструкций на различных стадиях эксплуатации (повреждения), необходимо описать соотношение между напряжениями и деформациями (кинетику петли гистерезиса), изменяющимися с ростом числа циклов нагружения в данных условиях.

Принятые в настоящее время допущения о существовании обобщенной диаграммы циклического деформирования на уровне равного числа циклов и значениях исходных деформаций не более десяти значений деформаций на пределе пропорциональности не подтверждаются экспериментом. Кроме того, во многих случаях местные деформации при исходном нагружении могут превышать десятикратно деформации, соответствующие пределу пропорциональности.

Более оправданным подходом является сопоставление деформационных характеристик материала при различных условиях нагружения в зависимости от степени накопленного повреждения η . И как видно из рис.2, сопоставление экспериментальных данных подтверждает существование для рассматриваемых материалов обобщенной диаграммы циклического деформирования независимо от степени исходной деформации.

Сопоставление диаграмм деформирования при одинаковых числах циклов

нагружения (рис. 2,а) не дают обобщенной диаграммы, которая получается при равных уровнях повреждений, но разных числах нагружения (рис. 2,б).

Это означает, что для каждого материала при различных постоянных амплитудах нагрузки для одинаковых уровней накопленных повреждений существует единая кривая циклического деформирования. Поэтому даже единственная поцикловая диаграмма деформирования есть набор обобщенных кривых на разных стадиях повреждения.

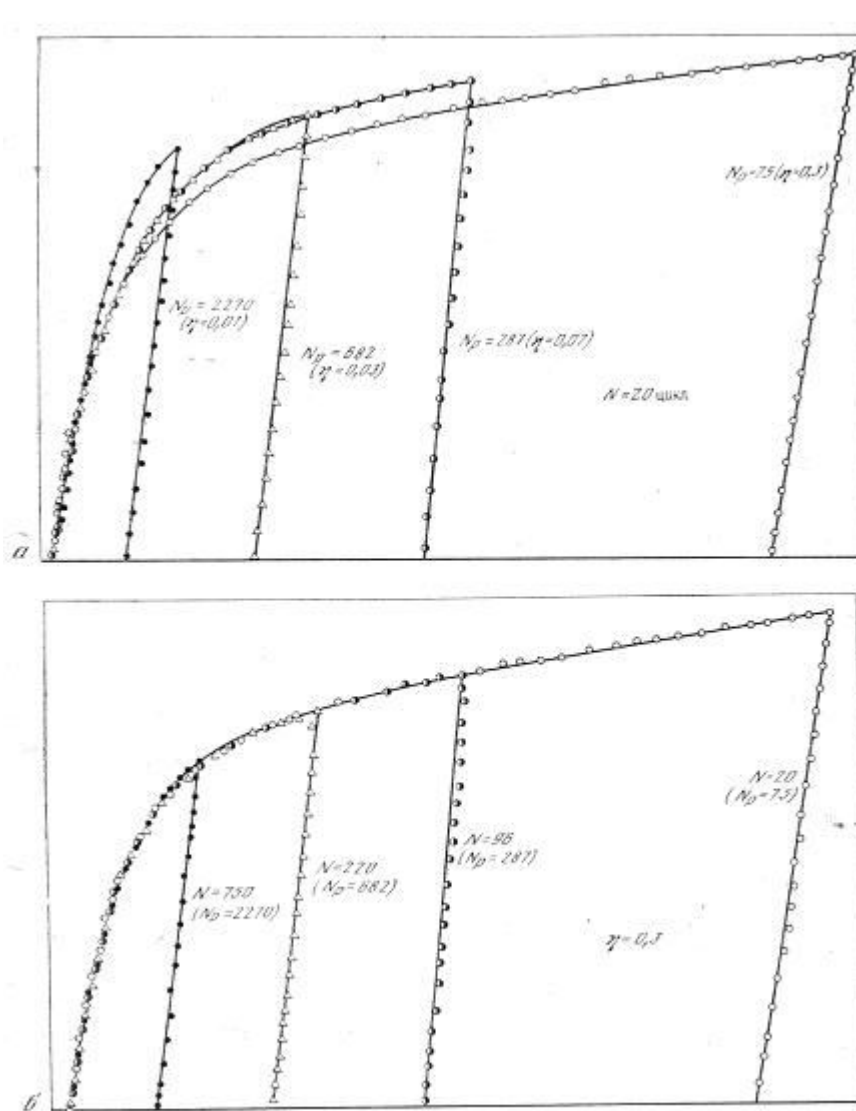


Рис.2. Обобщенная диаграмма циклического деформирования при мягком и жестком нагружении.

2. Закономерности усталостного разрушения конструкционных материалов

В течение многих десятилетий наряду с изучением характеристик сопротивления конструкционных материалов деформированию и разрушению при циклическом нагружении проводились также исследования по разработке критериев разрушения для оценки прочности машин, оборудования и конструкций различного назначения с использованием силовых, деформационных и энергетических подходов, и каждый из подходов насчитывает к настоящему времени десятки предложений по критериальным зависимостям [1]. Предложенные критерии, как правило, являются либо уравнениями кривой усталости

конкретного материала и заданных условий нагружения и потому не могут быть распространены на другие материалы и иные условия испытаний, либо для очень ограниченного числа материалов и условий нагружения, что по-прежнему требует получения большого количества экспериментальных данных и определения констант входящих в критериальные зависимости.

2.1. Деформационно-кинетический критерий усталостного разрушения на стадии образования трещин

Для малоциклового нагружения на основе представлений о разрушении как предельной работе микронапряжений на пути пластической деформации автором получены зависимости, определяющие накопление повреждений с ростом числа циклов нагружения [1-7]:

при жестком нагружении (нагружение с заданным размахом упругопластической деформации в цикле) в виде:

$$\eta = \int_0^N \frac{\delta^2}{\varepsilon^2} dN, \quad (1)$$

при мягком нагружении (нагружение с заданной амплитудой и асимметрией нагрузки в цикле)

$$\eta = \int_0^N \frac{\delta^2}{\varepsilon^2} dN + \int_0^N \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon} dN. \quad (2)$$

Первый член в зависимостях (2) определяет уровень накопленного повреждения от действия циклической пластической деформации, второй член - повреждение от односторонне накопленной пластической деформации за рассматриваемое число циклов нагружения. Зависимости (1) и (2) позволяют определять уровень накопленного повреждения за любое интересующее нас число циклов нагружения, в том числе и программного.

В предельном случае, когда наступает разрушение (образование трещины), зависимости (1) и (2) преобразуются в критерии соответственно для жесткого и мягкого нагружения в виде:

$$\int_0^{N_p} \frac{\delta^2}{\varepsilon^2} dN = 1, \quad (3)$$

$$\int_0^{N_p} \frac{\delta^2}{\varepsilon^2} dN + \int_0^{N_p} \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon} dN = 1, \quad (4)$$

где δ - ширина петли гистерезиса в полцикле растяжения, $\Delta\varepsilon$ - односторонне накопленная пластическая деформация в полцикле растяжения, ε - предельная деформация при статическом разрыве образца, соответствующая деформации перед потерей устойчивости пластической деформации, N и N_p - текущее и разрушающее число циклов соответственно.

При нагружении с заданным размахом упругопластической деформации (жесткое нагружение), когда размах пластической деформации в цикле (ширина петли гистерезиса)

изменяется незначительно, в области малого числа циклов разрушения ($N_p \leq 10^3$ циклов) с достаточной для практики точностью справедлива зависимость:

$$\delta^2 N_p = \varepsilon^2 \quad \text{или} \quad N_p = \frac{\varepsilon^2}{\delta^2}, \quad (5)$$

из которой следует, что все металлические материалы в указанном интервале долговечностей имеют единую кривую зависимости δ/ε от N_p .

Критерии (3 - 5) удовлетворительно описывают разрушение лишь при малом числе циклов нагружения (число циклов до разрушения составляет несколько тысяч циклов), когда повреждающая роль упругой деформации не велика по сравнению с ролью пластической деформации. С увеличением числа циклов до разрушения все большую долю повреждений вносит упругая составляющая действующих напряжений.

Было принято [7], что микронапряжения являются повреждающими и на пути упругой деформации. В результате были получены кинетические критерии, позволяющие описать уровни накопленных повреждений на любой стадии циклического нагружения, причем как в области малоциклового, так и многоциклового усталости, т.е. во всем диапазоне чисел циклов разрушения [1,7]:

при жестком нагружении

$$\eta = \int_0^N \frac{\delta e_{yn}}{\varepsilon^2} dN, \quad (6)$$

при мягком нагружении

$$\eta = \int_0^N \frac{\delta e_{yn}}{\varepsilon^2} dN + \int_0^N \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon} dN. \quad (7)$$

В предельном случае, когда наступает разрушение (образование трещины) соответственно

$$\int_0^{N_p} \frac{\delta e_{yn}}{\varepsilon^2} dN = 1, \quad (8)$$

$$\int_0^{N_p} \frac{\delta e_{yn}}{\varepsilon^2} dN + \int_0^{N_p} \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon} dN = 1, \quad (9)$$

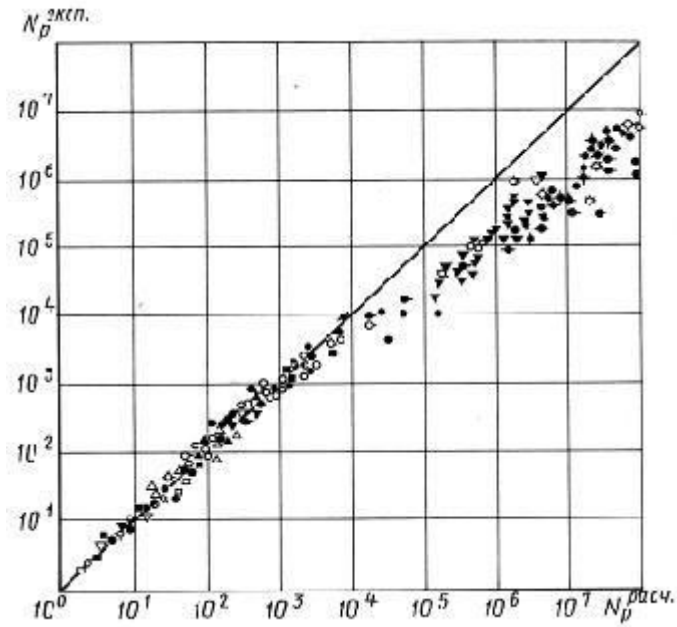
где $e_{yn} = \delta + e_y$, e_y - упругая деформация в полцикле растяжения.

При $e_{yn} = \text{const}$ и $\delta = \text{const}$ (например, для циклически стабильного материала или когда изменением ширины петли гистерезиса в процессе нагружения можно пренебречь) зависимость (8) можно записать в виде:

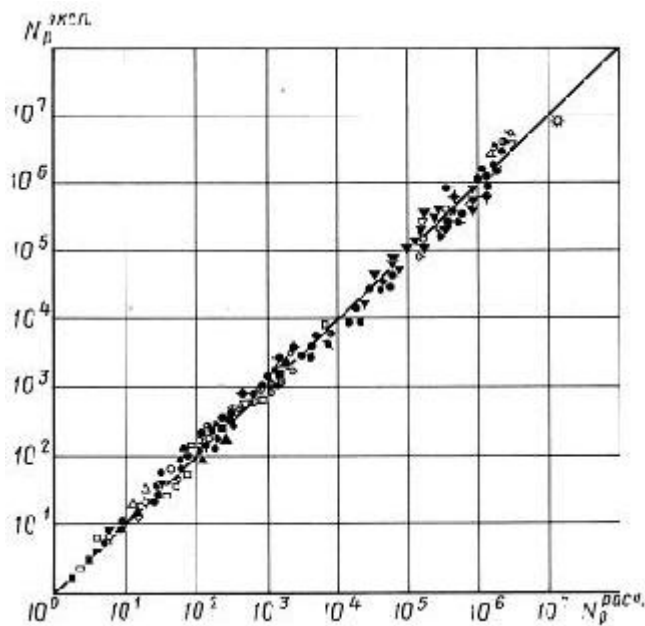
$$\delta e_{yn} N_p = \varepsilon^2 \quad \text{или} \quad \frac{\delta e_{yn}}{\varepsilon^2} N_p = 1. \quad (10)$$

Проверка критериев (8) и (9) показала их хорошее соответствие эксперименту во всем диапазоне чисел циклов до разрушения, т.е. как в малоциклового, так и в многоциклового

области (рис.3). Причем в малоцикловой области роль упругой невелика и тогда зависимости (3)-(10) дают практически одинаковые результаты (рис.3,а).



а)



б)

Рис.3. Сопоставление долговечностей, рассчитанных по уравнениям (6) и (13) с экспериментальными данными (соответственно *а* и *б*), полученными при мягком нагружении.

2.2. Накопление повреждений при циклическом нагружении на стадиях образования трещин

В зависимости от величины действующей нагрузки при мягком нагружении в общем повреждении превалирует либо усталостное, либо статическое повреждение, определяемые

соответственно по зависимостям (6) и (7). Для квазистатического разрушения (при малых долговечностях) определяющим является повреждение от накопленной деформации (рис.4).

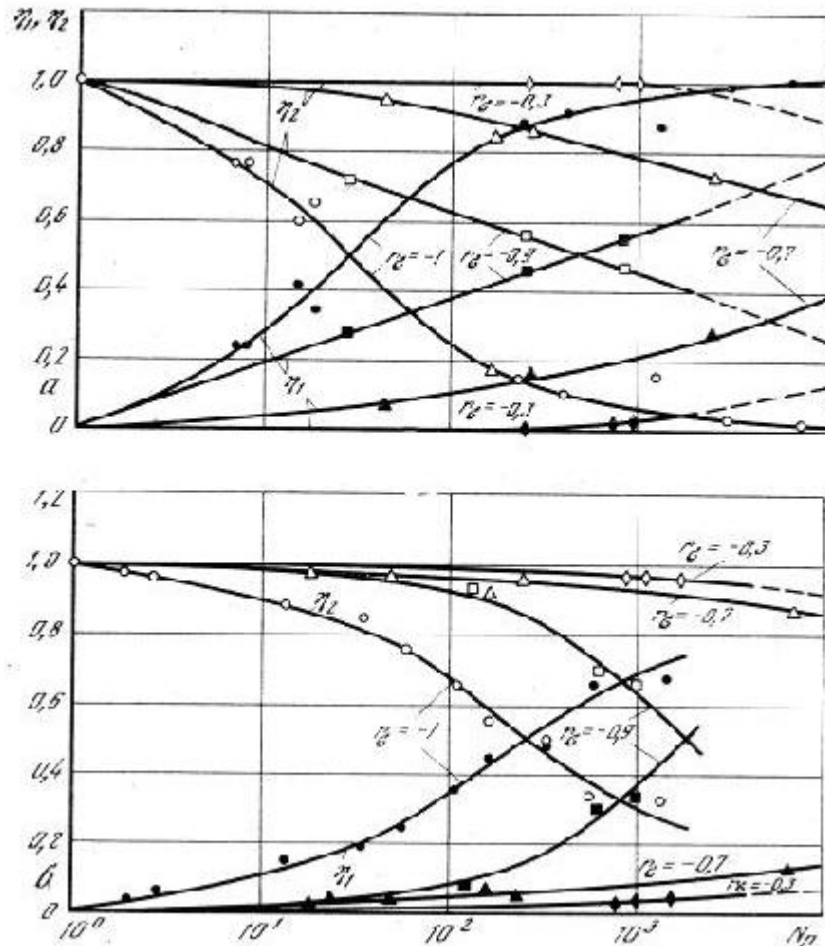


Рис.4. Зависимость накопленного к моменту разрушения усталостного η_1 и квазистатического η_2 повреждений для сталей 22к (а) и ТС (б) от долговечности при различных степенях асимметрии цикла.

При больших долговечностях разрушение (усталостный тип) происходит от накопленного циклического повреждения. В тех случаях, когда имеет место разрушение смешанного типа (к моменту разрушения материал накапливает некоторое количество остаточной деформации, а окончательное разрушение происходит в результате распространения усталостных трещин), накопленные усталостное и квазистатическое повреждение соизмеримы. Причем долговечности, при которых указанные виды накопленных повреждений одинаковы, определяются также типом материала и его структурным состоянием: чем материал пластичнее и более склонен к одностороннему накоплению пластической деформации, тем больше точка пересечения равных повреждений сдвигается в сторону больших долговечностей. Если для стали 22к эта точка соответствует числу циклов около 30 циклов, то для более пластической стали ТС – 300 циклам при симметричном цикле нагрузки.

Увеличение асимметрии цикла в сторону растяжения способствует росту накопленной деформации к моменту разрушения (при одних и тех же значениях максимальной амплитудной нагрузки при симметричном и асимметричном циклах) и тем самым повышает долю статического повреждения в общем накопленном.

Темп накопления повреждений для различных по циклическому поведению материалов (упрочняющиеся, разупрочняющиеся и циклически стабильные) различен.

В зависимости от типа материала интенсивность накопления повреждений на разных стадиях нагружения различна (рис.5). Для упрочняющегося материала АД-33 в области малоцикловых разрушений характерно большое накопление повреждений в начале нагружения (кривая 1), в то время как для разупрочняющейся стали сильно накапливаются повреждения на стадии окончательного разрушения ($N/N_p > 0,7$) – кривая 3. Интенсивность накопления повреждений для циклически стабилизирующейся стали 22к сравнительно равномерно увеличивается с ростом числа циклов нагружения (кривая 2).

Изменение условий нагружения (ступенчатое, переход с мягкого режима на жесткий, испытание с выдержками в условиях ползучести, двухчастотное нагружение и пр.) вызывает изменение сопротивления деформированию материала, а следовательно, влияет на темп накопления повреждений и в конечном случае и на долговечность образца (детали).

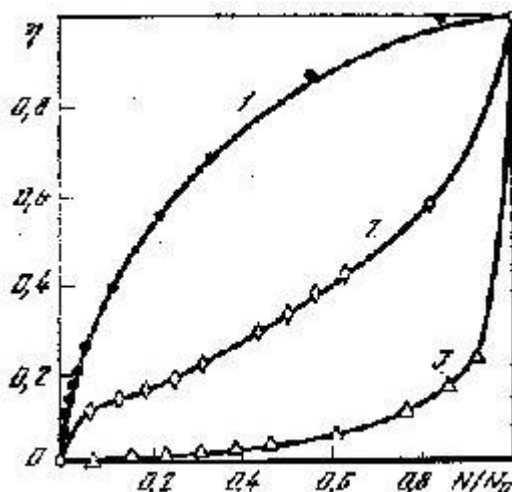


Рис.5. Характер интенсивности (темпа) накопления повреждений при малоцикловом нагружении упрочняющегося (кривая 1, алюминиевый сплав АД-33), разупрочняющегося (кривая 3, сталь ТС) и циклически стабильного (кривая 2, сталь 22к) материала.

При большом числе циклов до разрушения (более 10^4 циклов) роль пластической и упругой деформации может быть оценена в соответствии с зависимостями (8) и (9):

при жестком нагружении

$$\eta = \int_0^N \frac{\delta^2}{\varepsilon^2} dN + \int_0^N \frac{\delta e_y}{\varepsilon^2} dN, \quad (11)$$

при мягком нагружении

$$\eta = \int_0^N \frac{\delta^2}{\varepsilon^2} dN + \int_0^N \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon} dN + \int_0^N \frac{\delta e_y}{\varepsilon^2} dN, \quad (12)$$

в котором первый член определяет повреждение от пластической деформации, второй – от статической составляющей (односторонне накопленной деформации) и третий член определяет уровень накопленного повреждения от действия упругой деформации e_y – упругая деформация в полцикле растяжения, $e_y = \sigma / E$, $e_{yn} = \delta + e_y$, В предельном

случае критерии (6) и (7) записываются в виде (8) и (9).

Обработка экспериментальных данных в соответствии с зависимостями (6) и (7) показала, что вклад каждой из составляющих зависит от уровня нагрузки (долговечности): при малом числе циклов до разрушения повреждающей является преимущественно квазистатическая составляющая, при больших долговечностях - упругая. Сопоставимый вклад каждой из составляющих, как показано на рис.6 для стали ТС, наблюдается в области долговечностей 600-800 циклов.

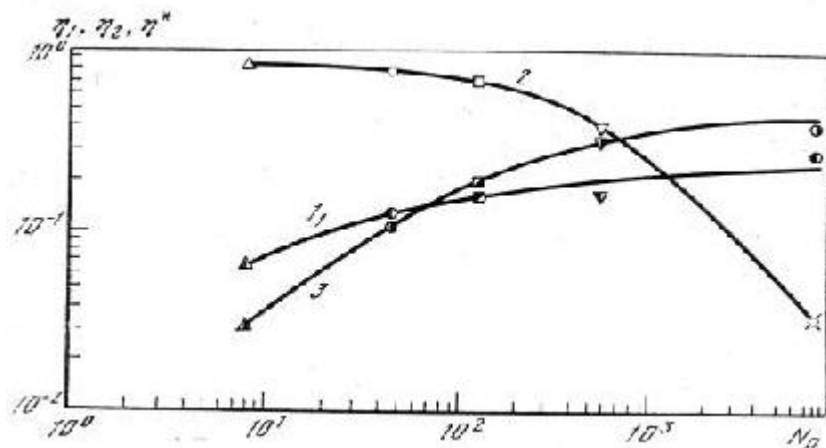


Рис.6. Зависимость предельно накопленных повреждений η_1 (1), η_2 (2) и η_3 (3) от долговечности стали ТС.

Критерии (8) и (9) являются кинетическими критериями, позволяющими определять повреждения на любой стадии нагружения, предельным случаем которого является появление макротрещины.

Исследованиями показано, что существует единое правило суммирования повреждений (единый критерий) при циклическом нагружении на основе предложенного кинетического критерия. При этом условия нагружения влияют на характеристики сопротивления деформированию, входящие в зависимости (8) и (9), но не изменяют правило (закон) суммирования повреждений в соответствии с этими критериями, в том числе и при программном нагружении (двухчастотное, ступенчатое, с перегрузками, с временными выдержками в полуциклах нагружения и т.д.).

2.3. Единая кривая усталости

Существование единого критерия усталостного разрушения позволяет предположить, что для всех конструкционных материалов существует и единая кривая усталости.

Действительно, если в зависимости (8) и (9) ввести соответственно для жесткого и мягкого нагружения следующие обозначения:

$$\alpha_e = \frac{\sqrt{\delta \varepsilon_{yn}}}{\varepsilon}, \quad \alpha_p = \frac{\sqrt{\delta \varepsilon_{yn} + \Delta \varepsilon \cdot \varepsilon}}{\varepsilon}, \quad (13)$$

то критерии (12) и (13) могут быть переписаны в виде:

$$\alpha_e^2 \cdot N_p = 1, \quad \alpha_p^2 \cdot N_p = 1, \quad (14)$$

где α_p определяется по средним значениям δ и $\Delta \varepsilon$.

Экспериментальная проверка зависимостей (13) и (14) подтвердила существование единой (обобщенной) кривой усталости для малоциклового и многоциклового нагружения (рис. 7). Причем обобщенная кривая усталости является единой для любых металлических материалов (и их любых структурных состояний, т. е. независимо от вида термообработки) и любых условий циклического нагружения (температура, частота нагружения, асимметрия цикла).

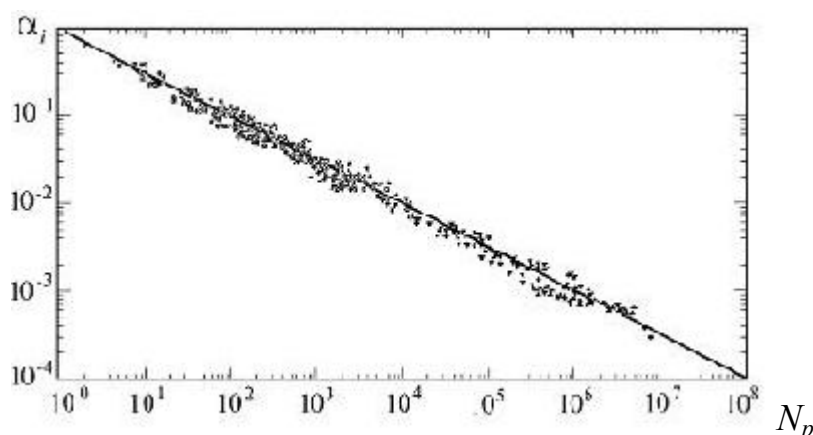


Рис.7. Единая (обобщенная) кривая усталости конструкционных материалов

Таким образом, существование единого критерия и единой кривой усталостного разрушения, а также единой (обобщенной) кривой циклической трещиностойкости конструкционных материалов во всем диапазоне долговечностей (малоцикловая и многоцикловая усталость), независимой от типа материала, его структурного состояния (термообработки), вида нагружения (одночастотное, двухчастотное, асимметричное, с временными выдержками, программное) и условий (температура, частота) нагружения формулирует новые подходы к испытаниям материалов на усталость, получению деформационных характеристик, к методам расчета на циклическую прочность, правилам выбора материала при конструировании, созданию средств испытательной и измерительной техники, к объему и характеру справочных данных, к условиям оптимизации свойств конструкционных материалов и их видов термообработки, к созданию новых материалов.

Список литературы

1. Романов А.Н. Разрушение при малоцикловом нагружении. М.: Наука. 1988. 280 с.
2. Романов А.Н. Сопротивление деформированию и разрушению конструкционных материалов при циклическом нагружении // Проблемы машиностроения и надежности машин. М. «Наука», 2012, №4, с.
3. Романов А.Н. Закономерности усталостного разрушения // Металловедение и термическая обработка, 2006, № 9, с. 19-27.
4. Романов А.Н. Инженерный журнал «Справочник», Приложение, 2007, №6, 36 с.
5. Романов А.Н. Энергетические критерии разрушения при малоцикловом нагружении: Сообщение 1. Энергия разрушения при малом числе циклов нагружения // Проблемы прочности, 1974, № 1, с. 3-10.
6. Романов А.Н. Энергетические критерии разрушения при малоцикловом нагружении: Сообщение 2. Циклический эффект Баушингера и критерии малоциклового разрушения // Проблемы прочности, 1974, № 1, с. 11-18.
7. Романов А.Н. Критерии усталостного разрушения с учетом работы остаточных микронапряжений // Прикладная механика. 1977. Т. 13, № 2, с. 69-79.

8. Романов А.Н. Выбор материала при конструировании. Кинетические критерии разрушения при циклическом нагружении на стадиях образования и развития трещин // Инженерный журнал «Справочник», 2001, № 10, с.53-56.
9. Романов А.Н. Структура и прочность конструкционных материалов. МЦНТИ, 1988, 155 с.