

620.178

ОСОБЕННОСТИ ПОВРЕЖДЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ПЕРЕМЕННОЙ НАГРУЖЕННОСТИ

Канд. техн. наук А. И. САВКИН

Рассматривается соотношение квазистатической и усталостной поврежденности двух контрастных материалов стали и титанового сплава на основании деформационно-энергетического подхода и их вклад в долговечность материала. Отмечается нелинейный характер накопления повреждений обеих сплавов.

Прогнозирование долговечности материала и конструкций при переменном нагружении и воздействии различных факторов является сложной проблемой [1,2], требующей учета физических представлений о природе повреждения [3]. Подход к проблеме усталости металлов с деформационных и энергетических позиций [4,5] позволяет получать результаты расчета параметров выносливости, наиболее близкими к практике. Анализ влияния различных факторов, таких, как ступенчатое нагружение [6], асимметрия цикла [7], пластическая деформация [8] и др., на усталостную прочность материалов выявляет особенности их повреждения при циклическом нагружении.

Изучалась кинетика повреждения титанового сплава и стали 45 при циклическом нагружении и влияния на нее предварительной пластической деформации и асимметрии цикла.

Испытания при циклических нагрузках проводили на корсетных образцах титанового сплава ПТ-3В и стали 45 при симметричном и одностороннем ($R = 0$) цикле нагружения в исходном состоянии. Одна из партий образцов из титанового сплава подвергалась предварительной пластической деформации при растяжении. Величина предварительной пластической деформации выбирались такой, которую мог получить материал в процессе изготовления или технологической обработки (например, правки), и составляла $e_{\text{пл}} = \ln \frac{l}{l - \theta_{\text{ст}}}$ - 3 и 5% где $\theta_{\text{ст}}$

- относительное остаточное сужение поперечного сечения образца.

В процессе циклического нагружения с помощью метода динамической петли гистерезиса оценивали рассеяние энергии сплавом, при циклическом нагружении. Для повышения разрешающей способности этого метода применяли синхронное вычитание упругой составляющей

деформации, что позволило определять коэффициент относительного рассеяния энергии с точностью до $0,5 \div 1\%$ [7]. Коэффициент рассеяния энергии вычисляли по формуле [8]

$$\Psi_y = k_\phi \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon}, \quad (1)$$

где k_ϕ - коэффициент формы петли механического гистерезиса (для параболической формы принимали $k_\phi = 1,33$); $\Delta \varepsilon$ - ширина петли механического гистерезиса; ε - размах деформации в процессе циклического нагружения.

Оценка повреждения титановых сплавов на основании энергетических критериев, определяемых по параметрам механического гистерезиса в переходной и особенно «чистой» области усталости, весьма затруднительна, поскольку эти сплавы относятся к сплавам с малой демпфирующей способностью. Предварительная малая пластическая деформация растяжением способствует интенсификации микропластических деформаций титановым сплавом [7]. Это позволило, даже в области «чистой» усталости, стабильно записывать петли механического гистерезиса и определять изменение рассеяния энергии в процессе циклического нагружения (рис. 1).

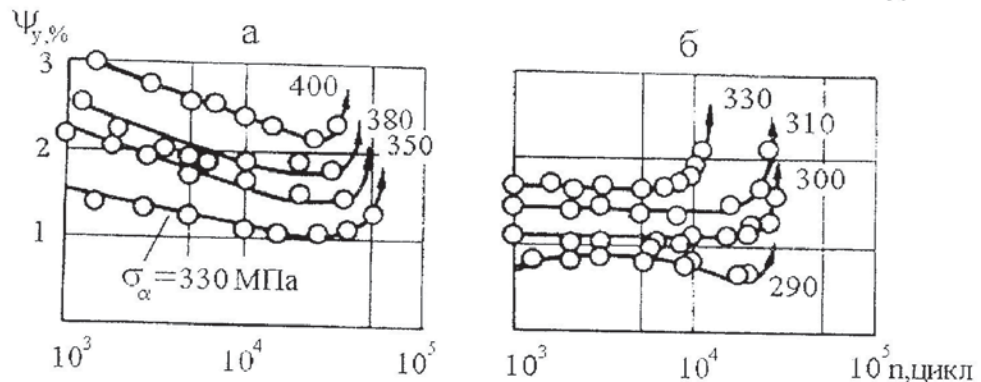


Рис. 1. Рассеяние энергии в образцах из титанового сплава ПТ-3В после предварительной пластической деформации $\varepsilon_{пл} = 0,03$ при циклическом нагружении: а – коэффициент асимметрии $R = -1$; б – коэффициент асимметрии $R = 0$.

За величину относительного рассеяния энергии Ψ_y , соответствующую данному напряжению или долговечности до разрушения, принимали значение Ψ_y на горизонтальном участке кривой $\Psi_y = \Psi_y(n)$ (рис. 1б) или в случае постоянно изменяющихся кривых (рис. 1а), значение Ψ_y , которое измерялось при половине числа циклов нагружения до разрушения. Как показали опыты, эта величина рассеянной энергии Ψ_y хорошо коррелирует с долговечностью материала до разрушения N , и по его величине можно прогнозировать момент разрушения (появлению трещины $0,2 \div 0,5$ мм).

Повреждение, накапливаемое в материале, может быть обусловлено как процессами, вызванными циклическостью изменения нагрузки и приводящими к усталостному разрушению, так и процессами направленного пластического деформирования, приводящими к квазистати-

ческому разрушению. Подход к разрушению, основанный на учете величины односторонне накопленной и циклической деформации, если пренебречь взаимным влиянием процессов накопления деформаций и усталостных повреждений, можно выразить [9] как

$$d_y + d_{ст} = 1, \quad (2)$$

где d_y и $d_{ст}$ - усталостное и квазистатическое повреждения. Линейная форма записи гипотезы суммирования усталостных повреждений наиболее проста, хотя и не всегда соответствует опытным данным [10].

Усталостный характер разрушения свойственен симметричному циклическому нагружению растяжением – сжатием, когда в силу специфики проведения испытаний исключена возможность накопления односторонних деформаций. Предполагая, что усталостное повреждение определяется в основном циклической (петельной) деформацией, можно связать разрушение материала при симметричном циклическом нагружении с накоплением усталостных повреждений, темп которых контролируется величиной относительного рассеяния энергии Ψ_y . При отнулевом циклическом нагружении в зависимости от величины амплитуды циклического напряжения может наблюдаться не только развитие петли механического гистерезиса, но и накопление односторонних пластических деформаций, которые трактуются как квазистатическое повреждение вида

$$d_{ст} = \frac{\theta_{ст}}{\theta_b}, \quad (3)$$

где $\theta_{ст}$ - накопленная односторонняя деформация сплава; θ_b - величина пластической деформации, определяемой в момент разрушения по результатам статических испытаний.

Долю усталостного повреждения при отнулевом нагружении ($R = 0$) в линейной трактовке определяли отношением долговечностей до разрушения (рис.2а):

$$d_y = N_0 / N_{-1}, \quad (4)$$

определяемых при отнулевом N_0 и симметричном N_{-1} циклическом нагружении, отвечающих одинаковой величине рассеяния энергии Ψ_y , контролирующей накопление усталостных повреждений. Возможность такого подхода основана на том, что циклическое нагружение в области долговечностей $N > 10^4$ циклов до разрушения, когда в материале при отнулевом нагружении образцов с исходной структурой односторонне накапливаемая деформация очень мала, долговечность до разрушения при одинаковом рассеянии энергии Ψ не зависит от асимметрии цикла нагружения R (рис.2а). Различие наблюдается лишь в области $N < 5 \cdot 10^3$ цик-

лов, когда относительная доля квазистатической повреждаемости $d_{ст}$ представляет уже значительную величину.

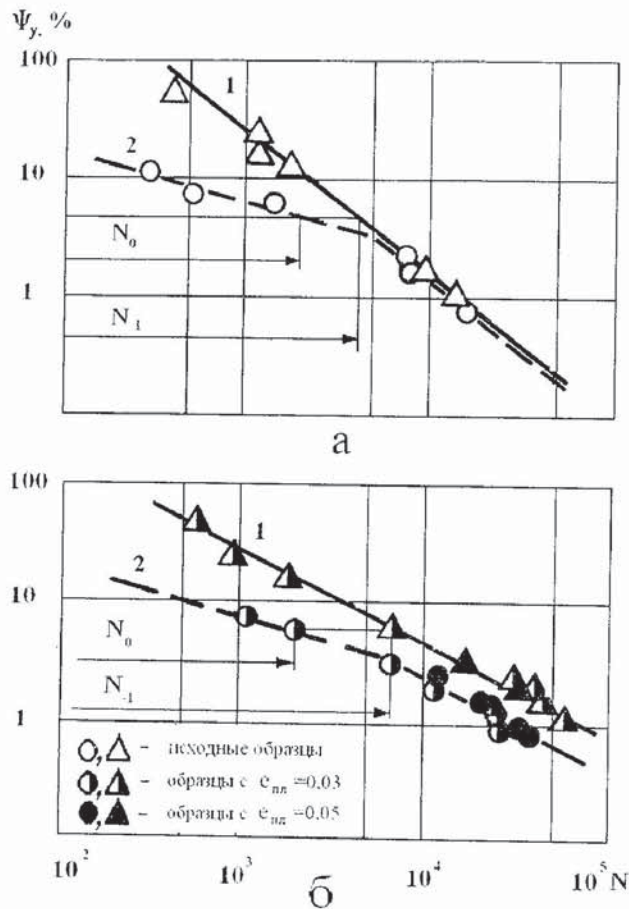


Рис.2. Связь относительного рассеяния энергии Ψ_y и долговечности до разрушения при симметричном (1) и отнулевом (2) циклическом нагружении титанового сплава ПТ-3В в различном структурном состоянии: а – исходное состояние; б – предварительная деформация растяжением.

Предварительная пластическая деформация растяжением вносит в структуру определенную долю квазистатической поврежденности $d_{ст}$, его состояние становится отличным от исходного. Поэтому относительную долю усталостного повреждения по соотношению (4) определяли относительно новых кривых $\Psi_y = \Psi_y(N)$ (рис.2б). В этом случае при долговечности до разрушения $N > 10^4$ циклов при симметричном (1) и отнулевом (2) циклах нагружения не совпадают, а являются эквидистантными кривыми.

Графики изменения параметров неупругости Ψ_y и $\theta_{ст}$, ответственных за усталостную и статическую составляющие для стали 45 представлены на рис.3а и 3б. Для одной и той же долговечности кривые $\Psi_y - N$ при $R = -I$ расположены выше и правее и, наоборот, кривые для отнулевого цикла нагружения $R = 0$ $\Psi_y - N$ – ниже и левее. Симметричному циклу ($R = -I$) характерен наиболее высокий уровень рассеяния энергии Ψ_y , но величина односторонней деформации близка к нулю ($\theta_{ст} \rightarrow 0$), поэтому будет естественным считать повреж-

дения при симметричном цикле состоящим только из первого слагаемого уравнения (2)

$$d_y = 1.$$

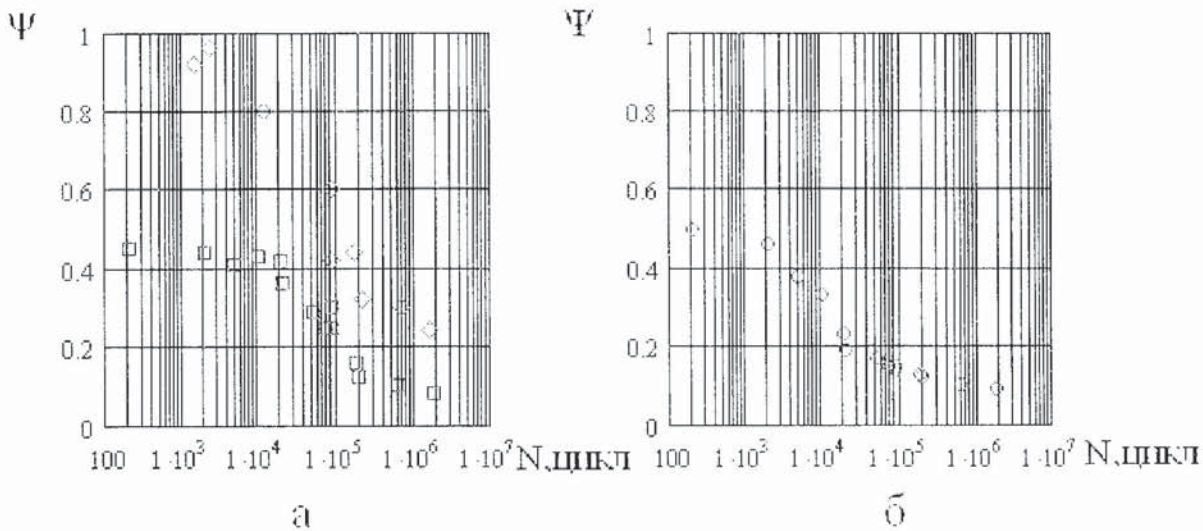


Рис.3. Изменения рассеяния энергии Ψ_y (а) и относительного остаточного сужения Θ_{cr} (б) стали 45 в зависимости от числа циклов разрушения N при симметричном (1) и отнулевом (2), (3) циклах нагружения

Титановый сплав и сталь – представители разных классов материалов, обладающих контрастными свойствами. Так, если для сплава ПТ-ЗВ уровень рассеяния энергии и величина накопленной пластической деформации на пределе выносливости для всех характеристик цикла практически одинаковы и близки к нулю, то для стали 45 оба параметра (Ψ_y и Θ_{cr}) зависят от асимметрии цикла и имеют довольно большие значения. В связи с этим для оценки величин долей повреждения d_y и d_{cr} , приводящих к разрушению для стали 45, следует из общей величины коэффициента рассеяния энергии и относительного сужения при разрушении вычитать их «безопасные» доли, соответствующие пределу выносливости при данной асимметрии цикла. При асимметричном нагружении усталостную составляющую повреждения для стали 45 можно определить по уравнению (4) соответствующему одинаковому значению рассеяния энергии (рис.3а), за вычетом ее доли на пределе выносливости.

При однократном растяжении (частном случае циклического нагружения, $\sigma_a = 0, R = +1$), когда отсутствует усталостная составляющая повреждений, $d_y = 0$, его статическая доля принята за единицу $d_{cr} = 1$ и оценивается относительным сужением разрывного образца θ_b . При асимметричном нагружении с характеристикой цикла R доля статического повреждения d_{cr} оценивается отношением (3), за вычетом ее доли на пределе выносливости.

Вычисленные таким образом значения составляющих повреждения для титанового сплава в исходном состоянии и после предварительной пластической деформации и стали 45 отложим на графике $d_y - d_{ст}$ (рис.4а). Если бы каждая из составляющих повреждения d_y и $d_{ст}$ являлись линейной функцией разрушающего числа циклов, то полное повреждение $d_y + d_{ст} = 1$ соответствовало бы диагонали графика.

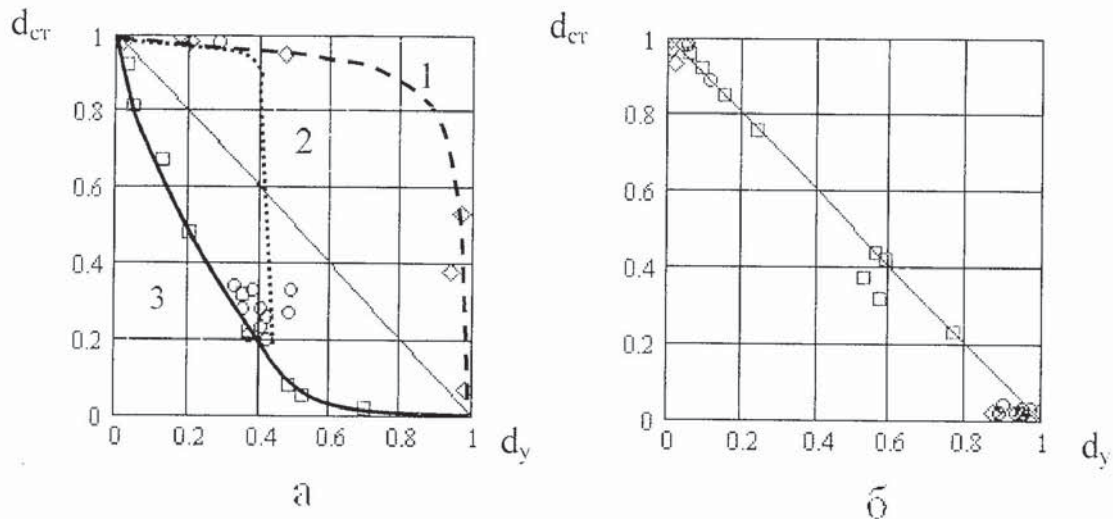


Рис.4. Взаимосвязь квазистатической $d_{ст}$ и усталостной d_y долей повреждения при отнулевом циклическом нагружении для сплава ТТ-3В в исходном (1) и пластически деформированном состоянии (2) и стали 45 (3) при линейном (а) и нелинейном (б) суммировании повреждений.

Но в действительности экспериментальные зависимости для обоих материалов оказались нелинейны, причем для стали сумма $d_y + d_{ст} < 1$, а для титанового сплава в исходном состоянии $d_y + d_{ст} > 1$, а после предварительной пластической деформации – наоборот. Соответственно и темп накопления повреждений для стали (кривая 3) замедленный, а для титанового сплава в исходном состоянии (кривая 1) – ускоренный, а после предварительной пластической деформации – замедленный (кривая 2).

Для образцов титанового сплава в исходном состоянии характерен ускоренный темп накопления повреждения d_y и $d_{ст}$, можно представить как

$$d_y^{m_0} + d_{ст}^{n_0} = 1, \quad (5)$$

где коэффициенты m_0 и n_0 определяют характер накопления повреждений.

Предварительное пластическое деформирование растяжением $e_{пл} = 2 - 5\%$, если оценивать темп квазистатической поврежденности линейным, вносит долю повреждения $d_{ст} \approx 0,163$. При циклическом отнулевом нагружении материал получает дополнительнос

квазистатическое $d_{ст}$ и усталостное d_y повреждения и соотношение между квазистатическим и усталостным повреждением определяется кривой 2 (см.рис.4а). Если при высоких амплитудах циклических напряжений темп поврежденности сплава d близок к исходному, т.е. является ускоренным, то в переходной и «чистой» областях усталости в темпах поврежденности исходного и пластически деформированного материала наблюдаются большие различия и суммарная поврежденность $d = d_y + d_{ст} < 1$.

Анализ показал, что темп накопления квазистатического повреждения пластически деформированных образцов можно принять таким же, как и для исходных, т.е. ускоренным, а характер накопления усталостных повреждений после пластической деформации изменяется и становится замедленным.

Условие разрушения может быть оценено как

$$d_y^{m_1 \cdot m_0} + d_{ст}^{n_0} = 1, \quad (6)$$

где m_1 - коэффициент влияния пластической деформации на темп усталостной поврежденности (в нашем случае $m_1 = 0,033$), который переходит от ускоренного $m_0 > 1$ к замедленному $m = m_0 m_1 < 1$. Показатели степени m и n , являясь структурно-чувствительными параметрами, отражают свойство материала накапливать усталостные и статические повреждения. Для стали 45 $m = 0,65$, $n = 0,34$, а для сплава ПГ-3В $m = 3$, $n = 4$. Результат суммирования повреждений исследуемых материалов в нелинейной постановке представлен на рис.4б.

К числу отличительных особенностей разрушения исследованных материалов следует отнести разную протяженность области перехода от квазистатического разрушения к усталостному, в которой оба вида повреждения d_y и $d_{ст}$ соизмеримы. Для титанового сплава повреждения имеет либо статический, либо усталостный характер. Для стали 45 типичен смешанный характер разрушения.

Результаты проведенных испытаний позволяют сделать следующие выводы.

1. Оценка характера повреждения испытываемых металлов при циклическом нагружении в области квазистатического и усталостного нагружения выявила нелинейную взаимосвязь поврежденности и числа циклов нагружения.
2. Выявлена специфика повреждения титанового сплава при отнулевом нагружении, проявляемая в отсутствии смешанного характера накопления квазистатического и усталостного повреждения. В зависимости от величины циклического напряжения поврежденность сплава носит либо квазистатический, либо усталостный характер. Для стали 45 характерен смешанный механизм повреждения с общим замедленным темпом в зависимости от числа нагружения.

3. Предварительная пластическая деформация титанового сплава растяжением при циклическом нагружении способствует изменению темпа накопления повреждений и перехода его от ускоренного к замедленному характеру изменения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Болотин В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. – М.: Машиностроение, 1984. – 312с.
2. Новак Х. Методы прогнозирования долговечности // Поведение стали при циклических нагрузках. – М.: Metallurgia, 1983, с.441-474.
3. Гурьев А.В., Савкин А.Н. Роль микропластических деформаций в развитии усталостных повреждений в металлах. В сб.: Механическая усталость металлов. – Киев: Наук. думка, 1983, с.122-129.
4. Троценко В.Т. Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении. – Киев: Наук. думка, 1981. – 340с.
5. Гурьев А.В., Савкин А.Н. Исследование влияния предварительной циклической перегрузки на изменение демпфирующей способности углеродистых сталей. В сб.: Рассеяние энергии при колебаниях механических систем. – Киев: Наук. думка, 1978, с.150-156.
6. Гурьев А.В., Кондратьев О.В. Влияние асимметрии цикла на рассеяние энергии и усталостную прочность. В сб.: Рассеяние энергии при колебаниях механических систем. – Киев: Наук. думка, 1982, с.206-214.
7. Гурьев А.В., Савкин А.Н. Влияние предварительной пластической деформации на рассеяние энергии в металле при циклических нагрузках. Там же. – с.190-198.
8. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Вибропоглощающие свойства конструкционных материалов. – Киев: Наук. думка, 1971. – 375с.
9. Серенсен С.В., Шнейдерович Р.М. Критерии разрушения при циклическом упруго-пластическом деформировании. В сб.: Прочность при малом числе циклов нагружения. – М.: Машиностроение, 1969, с.80-87.
10. Филатов В.М., Шнейдерович Р.М. Сопротивление малоциклового разрушению при повышенных температурах, Пробл. прочности, 1971, №2, с.79-88.