

УДК 621.539.43.001.24

А.Н. РОМАНОВ, д-р техн. наук, проф.

заведующий научным отделом

E-mail: alrom37@mail.ru

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, г. Москва, Россия

Поступила в редакцию 04.07.2017.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ НА СТАДИИ ОБРАЗОВАНИЯ ТРЕЩИН

Рассматривается ряд закономерностей деформирования и разрушения при циклическом нагружении конструкционных материалов, которые могут быть учтены при моделировании кинетики накопления повреждений и предельных состояний. Показано существование обобщенной диаграммы циклического деформирования и деформационно-кинетического критерия разрушения, установлен баланс энергии при циклическом деформировании и разрушении.

Ключевые слова: повреждение, критерий разрушения, обобщенная кривая деформирования, баланс энергии, неоднородность деформаций

Исследование закономерностей циклического деформирования и разрушения является одной из важнейших задач в оценке прочности, долговечности и живучести конструкций. В то же время процессы, развивающиеся в материале конструкции при длительной эксплуатации, приводящие к накоплению повреждений в нем, являются причиной образования трещин, развитие которых вызывает разрушение конструкций.

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 большей части срока эксплуатации. Практически все конструкционные материалы в состоянии поставки на начальной стадии упрочняются, а на заключительной (предразрушение) — разупрочняются. В соответствии с этим материалы подразделяются на циклически упрочняющиеся, разупрочняющиеся и стабилизирующиеся [1–3]. Тип материала может быть определен по кривым статического растяжения (рисунок 1). Если об упроч-

нении 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 (см. рисунок 1 а, кривая 1), т. е. упрочнение материала за счет пластической деформации протекает более интенсивно, чем разупрочнение за счет уменьшения сечения. У разупрочняющихся материалов большая доля накопления деформаций ($\epsilon_b < 0,5\epsilon_{\text{общ}}$, где ϵ_b — деформация, соответствующая пределу прочности σ_b) при статическом нагружении сопровождается падением условных напряжений (см. рисунок 1 а, кривая 2). Для циклически стабилизирующегося материала (см. рисунок 1 а, кривая 3) имеют место практически равные участки упрочнения (роста напряжений) и разупрочнения (падения напряжений), т. е. $\epsilon_b = 0,5\epsilon_{\text{общ}}$. Причем, как и при циклическом деформировании, начальная стадия статического растяжения у всех типов материалов характеризуется упрочнением (ростом напряжений).

Теплоустойчивая сталь (ТС), являющаяся разупрочняющимся материалом при комнатной температуре (кривые на рисунках 1 в и 2 б), остается разупрочняющейся и при повышенных температурах. При этом с увеличением температуры испытания длительность стадии разупрочнения увеличивается ($\eta_b^t < \eta_b^{20^\circ}$) — кривые на рисунках 1 в и 2 б. Сталь 22к является стабилизирующимся деформационно стареющим материалом. Температура интенсивного протекания деформационного старения составляет 250–350 °С. Как видно из рисунка 1 г, при температурах испытания до

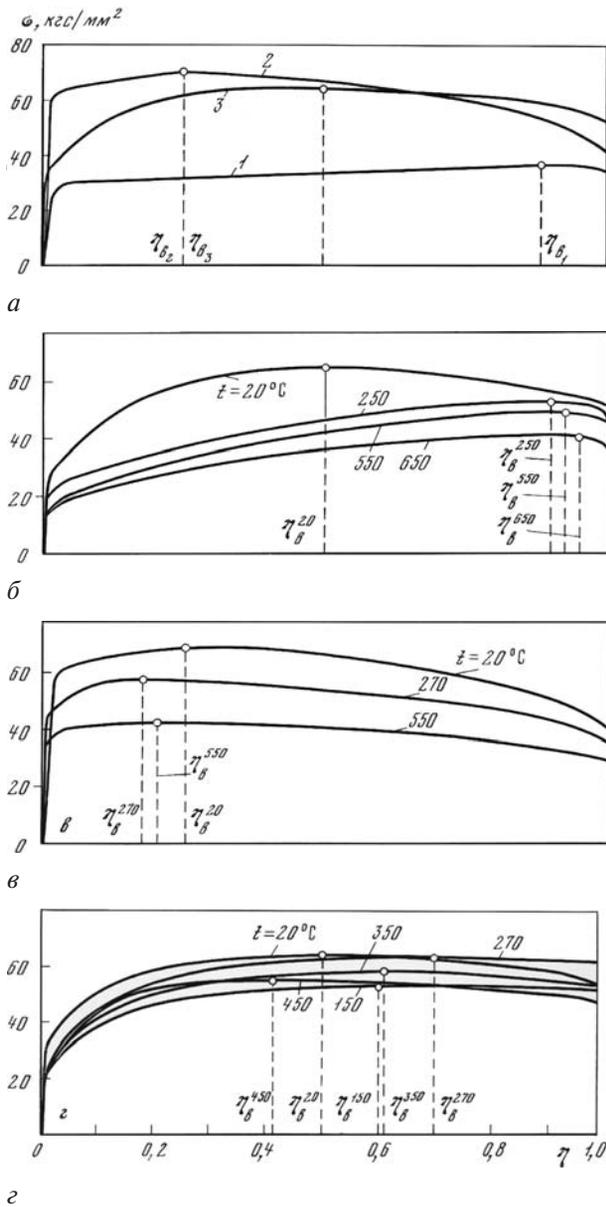


Рисунок 1 — Кривые статического растяжения при 20 °С (а: 1 — АД-33, 2 — сталь ТС, 3 — сталь 22к) и в диапазоне температур сталей Х18Н10Т (б), ТС (в), 22к (г)

ординатах «условное напряжение (или нагрузка) — статическое повреждение $\eta = \epsilon/\epsilon_{\text{общ}}$ ». При этом длительность стадии упрочнения характеризуется величиной $\eta_b = \epsilon/\epsilon_{\text{общ}}$. Для упрочняющихся материалов $\eta_b > 0,5$, для разупрочняющихся $\eta_b < 0,5$ и для циклически стабилизирующихся $\eta_b \approx 0,5$, т. е. длительность стадий упрочнения, разупрочнения и стабилизации при циклическом нагружении определяется соответственно соотношениями $\eta_b(\epsilon_{\text{общ}} - \eta_b)$. Для каждого материала при различных постоянных амплитудах нагрузки для одинаковых уровней накопленных повреждений существует единая кривая циклического деформирования (рисунок 3). Поэтому даже единственная поцикловая диаграмма деформирования есть набор обобщенных кривых на разных стадиях повреждения.

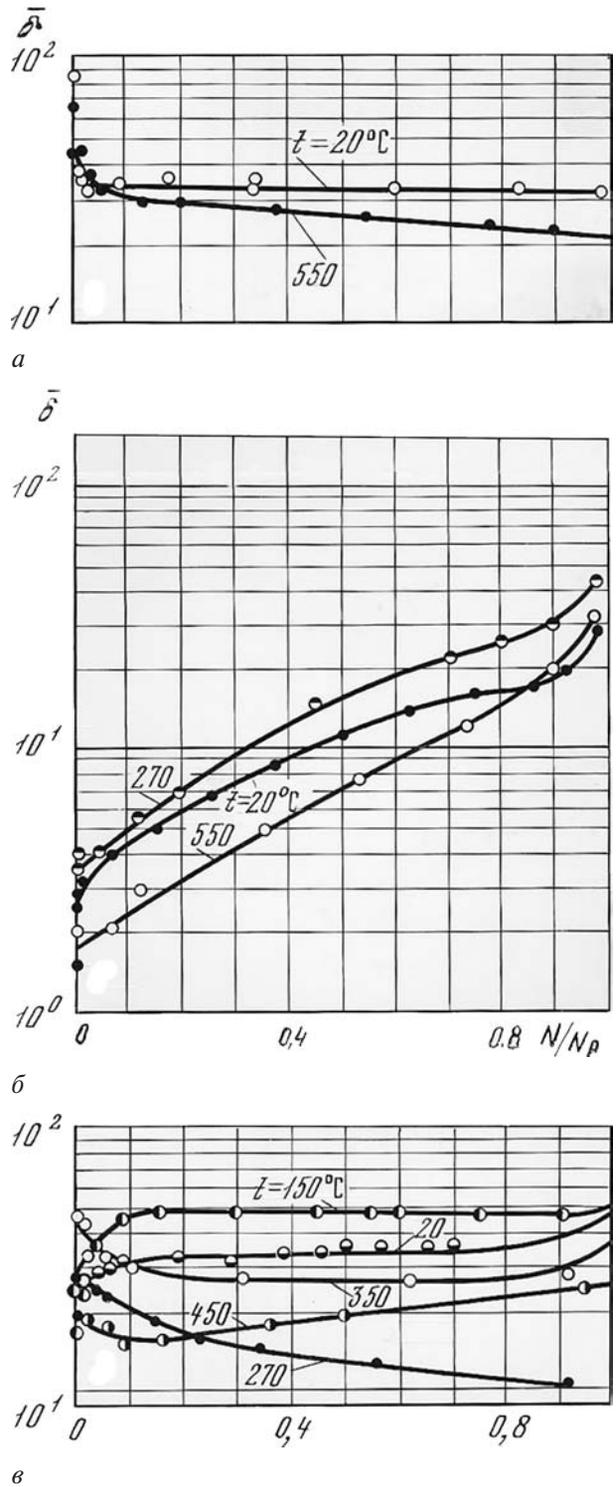


Рисунок 2 — Изменение ширины петли гистерезиса сталей Х18Н10Т (а), ТС (б) и 22к (в) в зависимости от температуры испытания

Кинетика накопления повреждений, зависящая от исходного структурного состояния материала и характера его изменений в процессе циклического нагружения, обуславливает образование предельных состояний (образование трещин), которое может быть описано соответствующим критерием разрушения.

В практике экспериментальных исследований нашли отражение силовые, деформационные

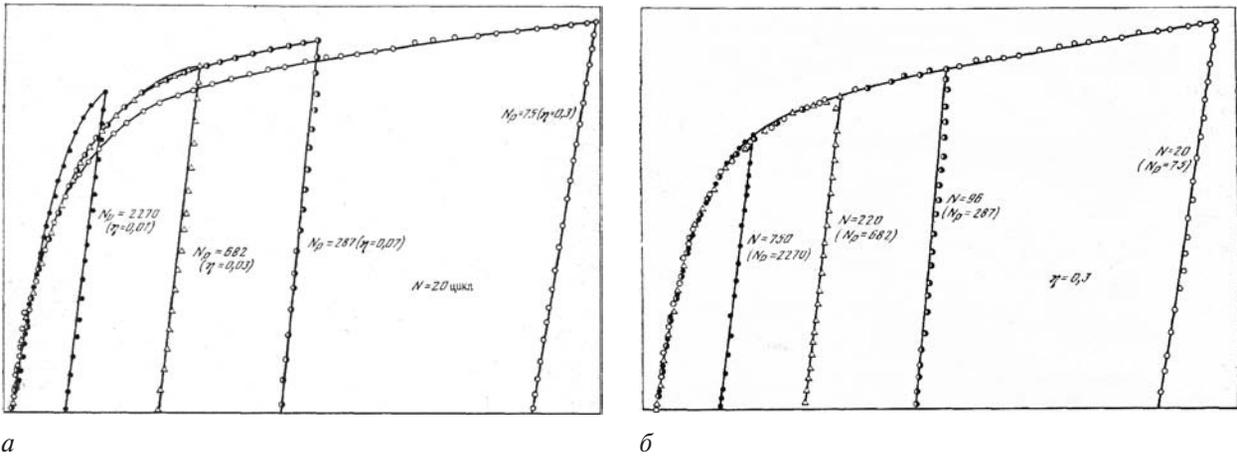


Рисунок 3 — Обобщенная диаграмма циклического деформирования при мягком и жестком нагружении

и энергетические критерии, которые описывают лишь частные условия нагружения [3]. Наиболее общими являются энергетические критерии.

Наибольшей трудностью их применения является то, что при статическом и циклическом разрушении конструкционных металлических материалов наряду с поглощением энергии, идущей на деформирование и повреждение материала, значительная доля энергии, затрачиваемой на разрушение материала, рассеивается в виде тепла [4, 5].

Результаты выполненных измерений суммарной затраченной механической выделившейся тепловой и поглощенной материалом энергии приведены на рисунке 4 а, из которого видно, что с увеличением деформации образца по закономерностям, близким к линейным, растет и величина составляющих суммарной механической и тепловой, а также их разности. При этом отношение суммарной механической к тепловой на протяжении всего процесса деформирования остается практически постоянным (см. рисунок 4 б) и составляет приблизительно 0,5, т. е. имеют место одинаковые значения тепловой и механической энергии. При этом установлена линейная зависимость приращения температуры от величины деформации [4].

Экспериментальное определение энергии разрушения по петлям гистерезиса показало, что энергия разрушения, подсчитанная по площадям петель, во много раз превышает энергию статического разрушения. Причем чем больше долговечность, тем больше величина поглощенной и рассеянной энергии при циклическом нагружении. Суммарная энергия в том и другом случаях оказывается функцией числа циклов нагружения и асимметрии цикла (рисунок 5).

Как видно из рисунка 6, при мягком нагружении разупрочняющегося материала (сталь 12Х2МФА) количество общей тепловой энергии Q и поглощенной материалом энергии E за цикл увеличивается с ростом ширины петель гистерезиса (и соответственно ростом площади петель) и числа циклов нагружения.

При жестком нагружении (с заданным размахом упругопластической деформации в циклах нагружения), когда ширина петли (соответственно и площадь петли) изменяется незначительно, в процессе всего времени деформирования механическая энергия A в полуциклах растяжения меньше, чем в полуциклах сжатия. При этом тепловая энергия так же, как и при мягком нагруже-

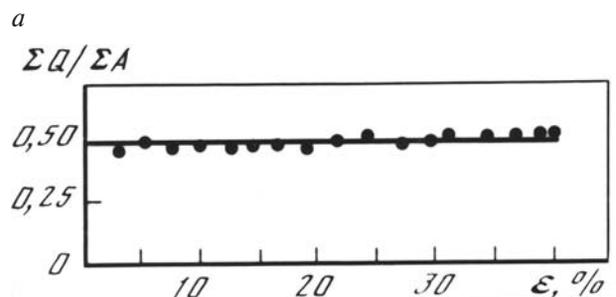
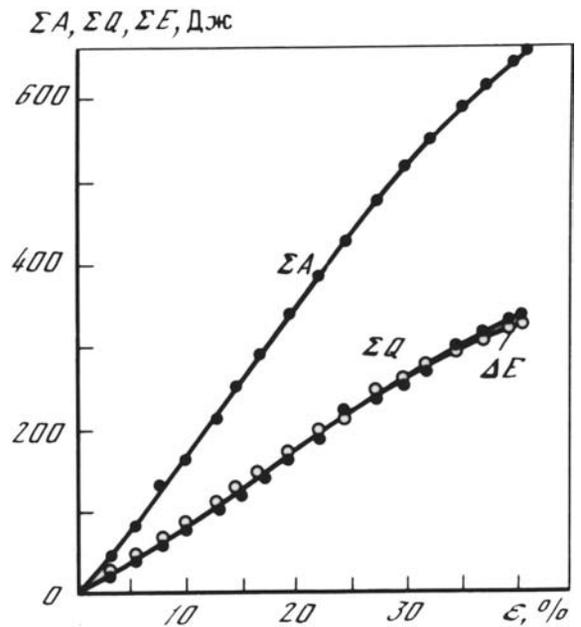


Рисунок 4 — Изменение суммарной механической A , тепловой Q и поглощенной материалом энергии E в зависимости от степени деформации при статическом нагружении

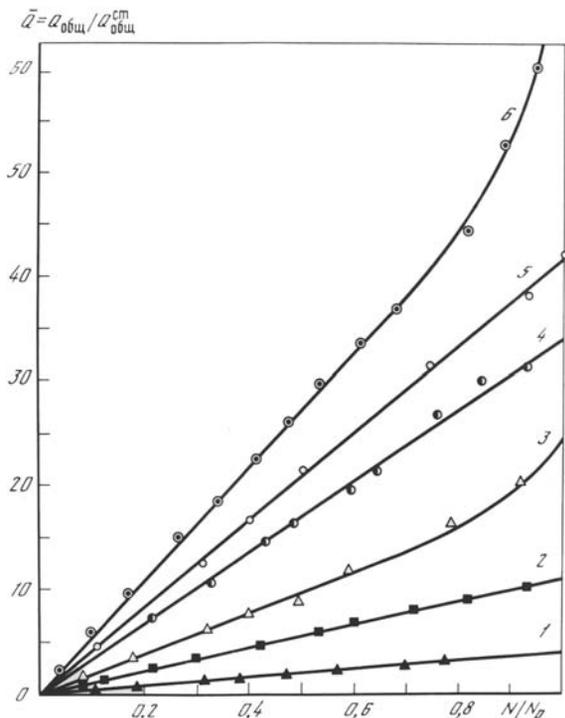


Рисунок 5 — Зависимость относительной величины общей поглощенной энергии циклического разрушения от долговечности и асимметрии цикла нагружения: 1 — $N_p = 256$ циклов, $r_\sigma = -0,3$; 2 — $N_p = 983$ цикла, $r_\sigma = -0,3$; 3 — $N_p = 253$ цикла, $r_\sigma = 0,9$; 4 — $N_p = 1853$ цикла, $r_\sigma = -0,7$; 5 — $N_p = 322$ цикла, $r_\sigma = -1$; 6 — $N_p = 1472$ цикла, $r_\sigma = -1$

нии (см. рисунок 6) больше в полцикле растяжения, а поглощаемая материалом энергия E больше в полцикле сжатия, чем в полцикле растяжения.

Как видно из рисунка 7, соотношение общей затраченной механической энергии A и тепловой Q остается постоянным на всех этапах нагружения (измерения осуществлялись в циклах, отмеченных точками на рисунке 7). При этом доля энергии, поглощаемой материалом на деформирование и повреждение единицы объема, остается практически постоянной.

Наибольшие сложности представляют собой процессы выделения и аналитического описания

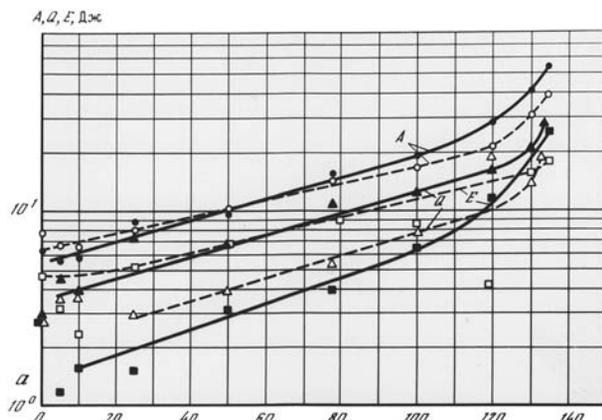


Рисунок 6 — Механическая энергия A (1), тепловая Q (2) и поглощенная материалом E (3) в полцикле растяжения (сплошные линии) и полцикле сжатия (пунктирные линии) для стали 12Х2МФА: мягкое нагружение

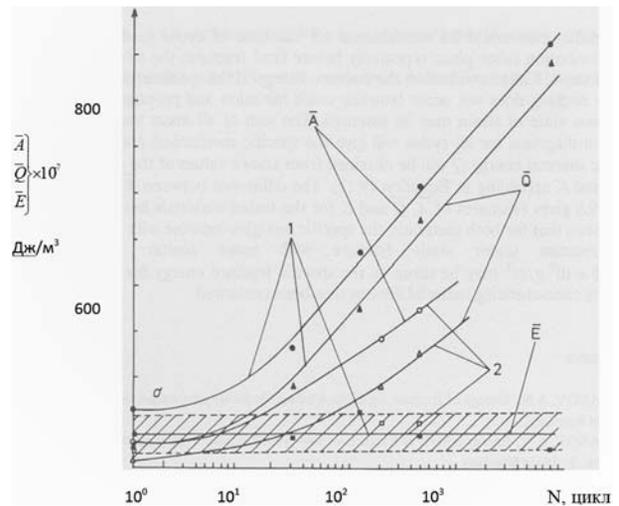


Рисунок 7 — Удельная (единицы объема m^3) механическая энергия A , тепловая Q и поглощенная материалом E для стали 12Х2МФА при различных долговечностях (кривые 1 и 2) в условиях мягкого нагружения в заштрихованной зоне

той доли энергии, которая расходуется для повреждения и в конечном счете на разрушения.

В работах [6, 7] было выдвинуто предположение, нашедшее широкую разработку, что разрушение есть работа остаточных микронапряжений на пути пластической деформации.

Как известно, остаточные микронапряжения обуславливают эффект Баушингера, определяющий разности пределов текучести (пропорциональности) при однократном нагревании на растяжение и сжатие при одинаковой амплитуде нагрузки (в исходном цикле усталостного нагружения).

Как показали данные измерений (рисунок 8), наибольшая разность между пределом пропорциональности на растяжение и пределом пропорциональности на сжатие ($\sigma_p - \sigma'_p$) наблюдается в первом цикле (статический эффект Баушингера). В последующих циклах величина ($\sigma_p - \sigma'_p$) уменьшается по сравнению с исходным нагружением, оставаясь практически постоянной до окон-

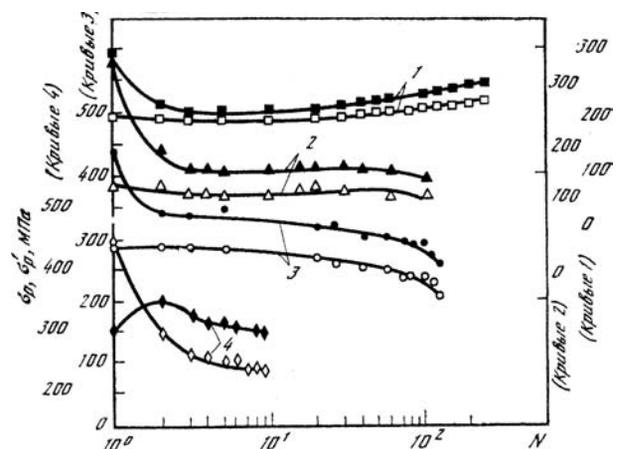


Рисунок 8 — Изменение пределов пропорциональности алюминиевого сплава АД-33 (1), сталей 22к (2) и ТС (3); темные кружки — полцикл растяжения, светлые — полцикл сжатия; 1 — АД-33, $\sigma_a = 298$ МПа; 2 — сталь 22к, $\sigma_a = 632$ МПа; 3 — сталь ТС, $\sigma_a = 474$ МПа; 4 — сталь ТС, $\sigma_a = 565$ МПа

чательного разрушения [1,3]. Разность $(\sigma_p - \sigma'_p)$ при $N > 1$ определяет эффект Баушингера, который в отличие от эффекта в первом цикле будем в дальнейшем называть циклическим эффектом Баушингера. Значения σ_p и σ'_p , определяющие циклический эффект Баушингера, зависят от типа материала (его способности упрочняться и разупрочняться), а также от величины деформации и предыстории нагружения. Как правило, большим деформациям в цикле соответствуют большие значения указанного эффекта.

Следует отметить, что для всех испытанных материалов предел пропорциональности в полцикле растяжения всегда больше предела пропорциональности в полцикле сжатия.

С увеличением количества циклов нагружения пределы пропорциональности σ_p и σ'_p остаются практически неизменными вплоть до участка неустойчивости перед окончательным разрушением только лишь для циклически стабильных материалов (см. рисунок 8, кривые 2 для стали 22к). Для упрочняющегося материала пределы пропорциональности увеличиваются, а для разупрочняющегося — уменьшаются (см. рисунок 8, кривые 1 для алюминиевого сплава АД-33 и кривые 3 для стали ТС соответственно).

В соответствии с экспериментальными данными между циклическим эффектом Баушингера, оцениваемым как $(\sigma_p - \sigma'_p)/\sigma_p^{ct}$, и шириной петли δ , отнесенной к предельной деформации при статическом разрушении ϵ , существует линейная связь [2, 3]:

$$(\sigma_p - \sigma'_p)/\sigma_p^{ct} = \delta/\epsilon, \quad (1)$$

где ϵ — предельная деформация перед потерей устойчивости пластической деформации.

Для малоциклового нагружения на основе представлений о разрушении как предельной работе микронапряжений на пути пластической деформации получена зависимость, определяющая накопление повреждений с ростом числа циклов нагружения [2, 3, 8] при мягком нагружении (нагружение с заданной амплитудой и асимметрией нагрузки в цикле) в виде:

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

При жестком нагружении (нагружение с заданным размахом упругопластической деформации в цикле) второй член в зависимости (2) равен нулю.

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. Зависимость (2) позволяет определять уровень накопленного повреждения за любое интересующее нас число циклов нагружения, в том числе и программного.

В предельном случае, когда наступает разрушение (образование трещины), зависимость (2) преобразуется в критерий в виде:

$$\int_0^{N_f} \frac{\epsilon_p^2}{\epsilon^2} dN + \int_0^{N_f} \frac{\Delta\epsilon}{\epsilon} dN = 1, \quad (3)$$

где ϵ_p — пластическая деформация (ширина петли гистерезиса) в полцикле растяжения; $\epsilon_p - \epsilon_p = \Delta\epsilon$ — односторонне накопленная пластическая деформация в полцикле растяжения; ϵ_p — пластическая деформация в полцикле сжатия; ϵ — предельная деформация при статическом разрыве образца, соответствующая деформации перед потерей устойчивости пластической деформации (рисунок 9); N и N_f — 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:

$$\epsilon_p^2 N_f = \epsilon^2 \quad \text{или} \quad N_f = \frac{\epsilon^2}{\epsilon_p^2}. \quad (4)$$

Зависимость (4) коррелирует с известным критерием Коффина [9], который может описывать лишь некоторые эксперименты: материалы и их структурные состояния с пластичностью менее 40–50 % в области малоциклового разрушения. В отличие от него критерий (4) определяет долго-

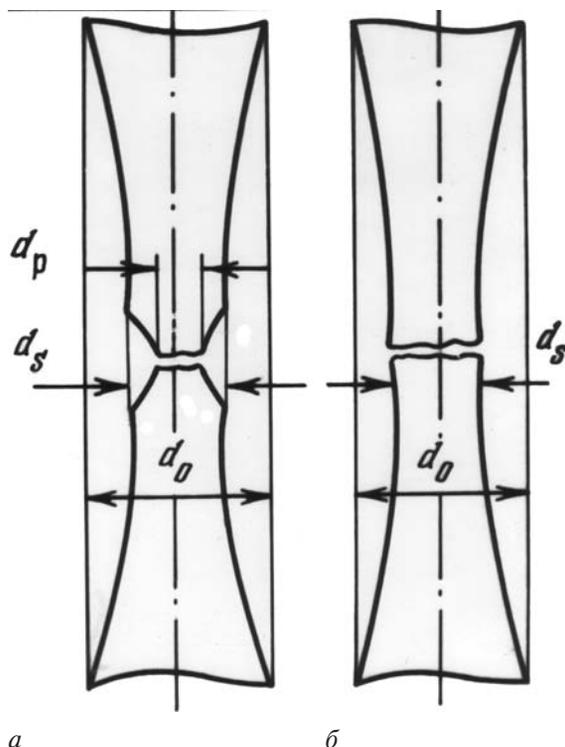


Рисунок 9 — Определение пластичности материала, обеспечивающей несущую способность материала

вечность независимо от структурного состояния материала, поскольку использует ту долю пластичности, которая определяет его несущую способность (см. рисунок 9).

Критерии (3) и (4) удовлетворительно описывают разрушение лишь при малом числе циклов нагружения (число циклов до разрушения составляет десятки 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 [2, 3, 10], 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 в виде

$$\eta = \int_0^N \frac{\epsilon_p \epsilon_{ep}}{\epsilon^2} dN + \int_0^N \frac{\Delta \epsilon}{\epsilon} dN. \quad (5)$$

В предельном случае, когда наступает разрушение (образование трещины)

$$\int_0^{N_f} \frac{\epsilon_p \epsilon_{ep}}{\epsilon^2} dN + \int_0^{N_f} \frac{\Delta \epsilon}{\epsilon} dN = 1, \quad (6)$$

где ϵ_{ep} — упругопластическая деформация в цикле: $\epsilon_{ep} = \epsilon_p + \epsilon_e$; ϵ_e — упругая деформация в полцикле растяжения $\epsilon_e = \sigma/E$.

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

$$\frac{\epsilon_p \epsilon_{ep}}{\epsilon^2} N_f = 1 \text{ или } N_f = \frac{\epsilon^2}{\epsilon_p \epsilon_{ep}}. \quad (7)$$

Проверка критериев (6) и (7) показала их хорошее соответствие эксперименту во всем диапазоне чисел циклов до разрушения, т. е. как малоциклового, так и в многоциклового области (рисунок 10). Причем в малоциклового области роль упругой составляющей невелика, и тогда зависимости (3) и (6) дают практически одинаковые результаты (см. рисунок 10 а).

Представленный критерий описывает кинетику накопления повреждений с ростом числа циклов нагружения (5) и предельное состояние — образование макротрещины (6) и (7).

Как известно, стадии образования макротрещины предшествует, как правило, стадия рассредоточенного трещинообразования (рисунок 11), связанная с локальной деформационной неоднородностью (рисунок 12), обусловленной структурной неоднородностью [11, 12]. Степень неоднородности пластической деформации $K_{\mu\epsilon_p}$

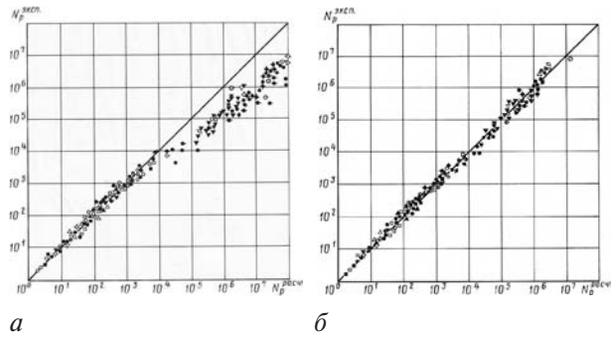


Рисунок 10 — Сопоставление долговечностей, рассчитанных по уравнению (4) с экспериментальными данными, полученными при мягком нагружении: а — без учета повреждающей роли упругой деформации; б — с учетом повреждающей роли упругой деформации

и односторонне накопленной деформации $K_{\mu\epsilon}$, может быть оценена коэффициентами неоднородности в нашем случае на базах 30–500 мкм), определяемыми в виде:

$$K_{\mu\epsilon_p} = \epsilon_{pk} / \epsilon_{pm} \text{ и } K_{\mu\epsilon} = \epsilon_k / \epsilon_m, \quad (8)$$

где ϵ_k — местная пластическая деформация в цикле; ϵ_{pm} — средняя величина ширины петли гистерезиса в цикле, измеренная на всей рабочей базе; ϵ_k — местная односторонне накопленная деформация в рассматриваемом цикле нагружения; ϵ_m — средняя односторонне накопленная к данному циклу деформация на измеряемой базе (40 мм).

С учетом неоднородности пластической деформации в циклах нагружения в соответствии с зависимостью (3), условие разрушения (появление микротрещин в локальных участках при $N_p < 10^5$ циклов), когда повреждение от упругой деформации невелико, может быть записано следующим образом:

$$\int_0^{N_p} \frac{(K_{\mu\epsilon_p} \epsilon_{pk})^2}{\epsilon^2} dN + \int_0^{N_p} \frac{K_{\mu\epsilon} \epsilon_k}{\epsilon} dN = 1, \quad (9)$$

где $K_{\mu\epsilon}$ и $K_{\mu\epsilon_p}$ — коэффициенты неоднородности циклической и односторонне накопленной деформаций.

Критерии (3) и (6) позволяют описывать накопление повреждений и предельные состояния в виде (9) в локальных зонах (рассредоточенное трещинообразование) испытываемого материала.

Таким образом, деформационно-кинетический критерий (6) дает возможность оценивать

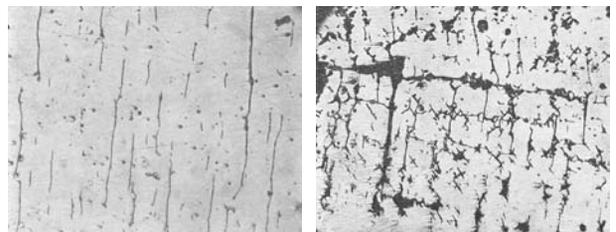


Рисунок 11 — Характер образования микротрещин на поверхности образцов при циклическом растяжении-сжатии (а) и кручении (б)

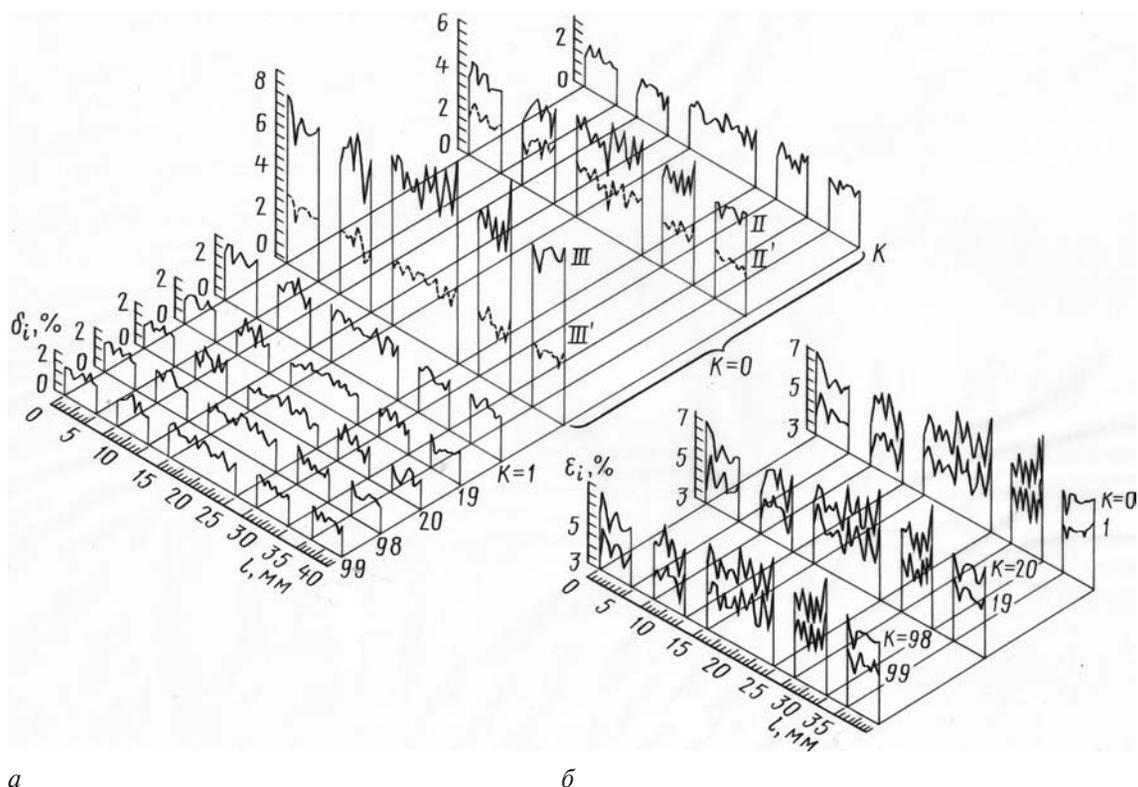


Рисунок 12 — Неоднородность развития циклических (а) и односторонне накопленных (б) пластических деформаций на рабочей базе образца с ростом числа циклов нагружения на локальных участках 0,5 мм и циклах нагружения 1, 10 и 50 (в полциклах растяжения $K = 0, 20$ и сжатия $K = 1, 19$ и 99. Исходное нагружение $K = 0$ проведено в три этапа с разгрузкой)

накопление повреждений (образование макро- и микротрещин) во всем диапазоне долговечностей (малоцикловая и многоцикловая усталость) независимо от условий циклического нагружения.

Список литературы

1. Романов, А.Н. Сопротивление деформированию конструкционных металлических материалов при циклическом нагружении / А.Н. Романов // Проблемы машиностроения и надежности машин. — 2012. — № 4. — С. 41–49.
2. Романов, А.Н. Критерии усталостного разрушения / А.Н. Романов // Справочник. Инженерный журнал. Приложение. — 2007. — № 6. — 36 с.
3. Романов, А.Н. Разрушение при малоцикловом нагружении / А.Н. Романов. — М.: Наука, 1988. — 280 с.
4. Romanov A.N., Gadenin M.M. Energy balance for elastoplastic fracture: static and cyclic loading. Hlfstisity and Failure Behavior of Solids. Td. G.C. Sih, A.J.Ishlinsky, S.T. Mileiko, 1989. — Pp.167–199.
5. Романов, А.Н. Проблемы материаловедения в механике деформирования и разрушения на стадии образования трещин. Ч. 5: Энергия статического и циклического разрушения конструкционных металлических материалов / А.Н. Романов // Вестн. науч.-техн. развития: интернет-журнал. — 2014. — № 9. — С. 10–30.
6. Новожилов, В.В. О перспективах построения критерия прочности при сложном нагружении / В.В. Новожилов, О.Г. Рыбакина // Докл. III совещ. по механическим вопросам усталости. — М.: ИМАШ, 1966. — С. 71–80.
7. Рыбакина, О.Г. Феноменологические описание малоцикловой усталости в условиях концентрации напряжений. Проблемы твердого деформируемого тела / О.Г. Рыбакина. — М.: Судостроение, 1970. — С. 30–33.
8. Романов, А.Н. Проблемы материаловедения в механике деформирования и разрушения на стадии образования трещин. Ч. 6: Критерии разрушения с учетом работы микронапряжений на пути пластической деформации при малоцикловом нагружении конструкционных материалов / А.Н. Романов // Вестн. науч.-техн. развития: интернет-журнал. — 2015. — № 3. — С. 32–41.
9. Coffin, L.F.F. A study of the effects of cyclic terminal stresses on a ductile metal. Trans. ASME. // L.F.F. Coffin. — 1954. — Vol. 756. — Pp. 931–936.
10. Романов, А.Н. Проблемы материаловедения в механике деформирования и разрушения на стадии образования трещин. Ч. 8: Критерии разрушения с учетом работы микронапряжений на пути упругой деформации при усталостном нагружении конструкционных материалов / А.Н. Романов // Вестн. науч.-техн. развития: интернет-журнал. — 2015. — № 6. — С. 31–39.
11. Романов, А.Н. Рассредоточенное трещинообразование в конструкционных материалах при циклическом нагружении в связи с их структурной и деформационной неоднородностью / А.Н. Романов, Н.И. Филимонова // Проблемы машиностроения и надежности машин. — 2012. — № 5. — С. 30–40.
12. Романов, А.Н. Проблемы материаловедения в механике деформирования и разрушения на стадии образования трещин. Ч. 2: Структурная и деформационная неоднородность конструкционных материалов и рассредоточенное трещинообразование / А.Н. Романов // Вестн. науч.-техн. развития: интернет-журнал. — 2014. — № 1. — С. 37–54.

ROMANOV Alekcander N., D. Sc. in Eng., Prof.

Head of the Department

E-mail: alrom37@mail.ru

Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Received 04 July 2017.

REGULARITIES OF DEFORMATION AND FRACTURE OF CONSTRUCTION MATERIALS AT THE STAGE OF CRACKING UNDER CYCLIC LOADING

A number of regularities of deformation and fracture under cyclic loading of structural materials that can be taken into account in modeling the kinetics of damage accumulation and limiting states are considered. The existence of a generalized diagram of cyclic deformation and the deformation-kinetic criterion of destruction is shown, a balance of energy for cyclic deformation and fracture is established.

Keywords: damage, failure criterion, generalized curve deformation, energy balance, inhomogeneity of deformation

References

- Romanov A.N. Soprotivlenie deformirovaniyu konstrukcionnyh metallicheskih materialov pri ciklicheskom nagruzhenii [Resistance to deformation of constructional metal materials at cyclic loading]. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin* [Problems of mechanical engineering and reliability of cars], 2012, no. 4, pp. 41–49.
- Romanov A.N. Kriterii ustalostnogo razrusheniya [Criteria of fatigue failure]. *Inzhenernyj zhurnal "Spravochnik"* [Engineering magazine "Spravochnik"], 2007, no. 6. 36 p.
- Romanov A.N. *Razrushenie pri malociklovom nagruzhenii* [Fracture at low-cyclic loading]. Moscow, Nauka, 1988. 280 p.
- Romanov A.N., Gadenin M.M. Energy balance for elastoplastic fracture: static and cyclic loading. *Plastisity and Failure Behavior of Solids*, 1989, pp.167–199.
- Romanov A.N. Problemy materialovedeniya v mehanike deformirovaniya i razrusheniya na stadii obrazovaniya treshhin. Chast 5. Jenergiya staticheskogo i ciklicheskogo razrusheniya konstrukcionnyh metallicheskih materialov [Materials science problems in mechanics of deformation and destruction at a stage of formation of cracks. Part 5. Energy of static and cyclic destruction of constructional metal materials]. *Vestnik nauchno-tehnicheskogo razvitiya* [Bulletin of scientific and technical development], 2014, no. 9, pp. 10–30.
- Novozhilov V.V., Rybakina O.G. O perspektivah postroeniya kriteriya prochnosti pri slozhnom nagruzhenii [On the prospects of constructing the criterion of strength under complex loading]. *Trudy. III soveshch. po mehanicheskim voprosam ustalosti* [Proc. III meeting on mechanical questions of fatigue]. Moscow, IMASH, 1966, pp. 71–80.
- Rybakina O.G. *Fenomenologicheskie opisanie malociklovoj ustalosti v usloviyah koncentracii naprjazhenij. Problemy tverdogo deformiruemogo tela* [Phenomenological description of low-cyclic fatigue in the conditions of concentration of tension. Problems of a solid deformable body]. Moscow, Sudostroenie, 1970, pp. 30–33.
- Romanov A.N. Problemy materialovedeniya v mehanike deformirovaniya i razrusheniya na stadii obrazovaniya treshhin. Chast 6. Kriterii razrusheniya s uchetom raboty mikronaprjazhenij na puti plasticheskoj deformacii pri malociklovom nagruzhenii konstrukcionnyh materialov [Materials science problems in mechanics of deformation and destruction at a stage of formation of cracks. Part 6. Criteria of destruction taking into account work of microtension on the way of plastic deformation at low-cyclic loading of constructional materials]. *Vestnik nauchno-tehnicheskogo razvitiya* [Bulletin of scientific and technical development], 2015, no. 3, pp. 32–41.
- Coffin L.F.F. *A study of the effects of cyclic terminal stresses on a ductile metal*. Nrans, ASME, 1954, vol. 756, pp. 931–936.
- Romanov A.N. Problemy materialovedeniya v mehanike deformirovaniya i razrusheniya na stadii obrazovaniya treshhin. Chast 8. Kriterii razrusheniya s uchetom raboty mikronaprjazhenij na puti uprugoj deformacii pri ustalostnom nagruzhenii konstrukcionnyh materialov [Materials science problems in mechanics of deformation and destruction at a stage of formation of cracks. Part 8. Criteria of destruction taking into account work of microtension on the way of elastic deformation at fatigue loading of constructional materials]. *Vestnik nauchno-tehnicheskogo razvitiya* [Bulletin of scientific and technical development], 2015, no. 6, pp. 31–39.
- Romanov A.N., Filimonova N. I. Rassredotochennoe treshhinoobrazovanie v konstrukcionnyh materialah pri ciklicheskom nagruzhenii v svyazi s ih strukturnoj i deformatsionnoj neodnorodnostju [The dispersed cracking in constructional materials at cyclic loading in connection with their structural and deformation heterogeneity]. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin* [Problem of mechanical engineering and reliability of cars], 2012, no. 5, pp. 30–40.
- Romanov A.N. Problemy materialovedeniya v mehanike deformirovaniya i razrusheniya na stadii obrazovaniya treshhin. Chast 2. Strukturnaja i deformatsionnaja neodnorodnost konstrukcionnyh materialov i rassredotochennoe treshhinoobrazovanie [Materials science problems in mechanics of deformation and destruction at the stage of formation of cracks. Part 2. Structural and deformation inhomogeneity of constructional materials and dispersed cracking]. *Vestnik nauchno-tehnicheskogo razvitiya* [Bulletin of scientific and technical development], 2014, no. 1, pp. 37–54.