

УДК 621.539.43.001.24

ПРОБЛЕМЫ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ В МЕХАНИКЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ НА СТАДИИ ОБРАЗОВАНИЯ ТРЕЩИН

Часть 6. Критерии разрушения с учетом работы микронапряжений на пути пластической деформации при малоцикловом нагружении конструкционных материалов.

© Александр Никитович Романов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

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

alrom37@mail.ru

На основе анализа баланса энергии при циклическом упругопластическом деформировании конструкционных металлических материалов и определении разрушающей доли энергии как предельной работы остаточных микронапряжений на пути пластической деформации, определяемой циклическим эффектом Баушингера, получен энергетический критерий разрушения в деформационных терминах. Дано экспериментальное обоснование критерия в области малоциклового усталости.

Ключевые слова: критерий разрушения, разрушающая доля энергии, предел текучести, упругопластическое деформирование, микронапряжения, циклическое нагружение, петля гистерезиса.

Для оценки предельных состояний при циклическом нагружении разрабатываются и используются силовые, деформационные и энергетические критерии. Наиболее общими являются энергетические подходы. С точки зрения практических приложений наиболее приемлемыми являются силовые и деформационные критерии.

Характер поведения материала при циклическом нагружении [1-4] и определенный баланс энергии, затрачиваемый при этом [5], позволяет записать условие разрушения (предельное состояние) в виде:

$$\int_0^{N_p} (\sigma_p \delta - \sigma'_p \delta') dN = Q_{ст}, \quad (1)$$

где $\sigma_p^{ст}$ - предел пропорциональности, определяемый при однократном разрушении (или в нулевом полуцикле нагружения); ε – деформация, измеряемая на рабочей базе при однократном статическом разрушении; σ_p и σ'_p - циклические пределы пропорциональности соответственно в полуцикле растяжения и сжатия; δ и δ' – ширина петли соответственно в полуциклах растяжения и сжатия; σ и σ' – текущие значения напряжения в полуциклах растяжения и сжатия; N_p – разрушающее число циклов.

В соответствии с предложенным методом определения разрушающей доли энергии при циклическом нагружении [5] разрушающая энергия при статическом нагружении будет

$$Q_{ст} = \sigma_p^{ст} \varepsilon \quad (2)$$

и тогда можно записать:

$$\int_0^{N_p} (\sigma_p \delta - \sigma'_p \delta') dN = \sigma_p^{ст} \varepsilon. \quad (3)$$

Следует отметить, что при циклическом нагружении нулевой полуцикл является специфическим, и при исходном нагружении происходит своеобразный «вывод» материала

на режим (приспособление), при котором должно осуществляться циклическое нагружение, и, по существу, последнее начинается с первого полуцикла сжатия.

Кроме того, при исходном нагружении (нулевой полуцикл) материал имеет предел пропорциональности, сильно отличающийся от циклического, и иной измеряемый модуль упругости.

Исходная деформация также может сильно отличаться от ширины петли (в особенности в случае испытаний при высоких температурах и асимметричном цикле нагрузки). Например, для циклически упрочняющегося алюминиевого сплава АД-33 разрушение при пульсирующем цикле в малоцикловой области ($N_p = 1500$) возможно лишь при исходной деформации $\varepsilon^{(0)}$, равной приблизительно 0,5.

В связи с этим (в ряде случаев, например, для упрочняющихся материалов) целесообразно исходное нагружение в уравнении (1) выделить в виде отдельного члена (исходный цикл нагружения), и тогда условие разрушения может быть записано в виде

$$\sigma_p^{ct} \varepsilon^{(0)} + \int_1^{N_p} (\sigma_p \delta - \sigma_p' \delta') dN = \sigma_p^{ct} \varepsilon, \quad (4)$$

тогда при статическом разрушении $\varepsilon^{(0)} = \varepsilon$.

При долговечностях, исчисляемых сотнями циклов и более, а также для малопластичных материалов вклад $\varepsilon^{(0)}$ в общую накопленную энергию невелик и последняя может быть подсчитана по зависимости (1).

Для жесткого нагружения (с заданным размахом упругопластической деформации) кинетика петли практически не имеет места и можно принять $\delta = \delta' = const$. В этом случае зависимость (1) с учетом зависимости (3) может быть представлена в виде

$$\int_0^{N_p} \delta (\sigma_p - \sigma_p') dN = \sigma_p^{ct} \varepsilon. \quad (5)$$

В зависимости (5) разность циклических пределов пропорциональности ($\sigma_p - \sigma_p'$) представляет собой циклический (в отличие от статического, определяемого в первом цикле), эффект Баушингера в каждом цикле нагружения, а величина δ , суммируемая по числу циклов, есть своеобразный путь пластической деформации.

Если считать, что эффект Баушингера определяется величиной внутренних микронапряжений, то за критерий малоциклового разрушения может быть принята работа внутренних микронапряжений на пути пластической деформации, предельная величина которой может быть определена по кривой однократного статического разрушения, и тогда критерий (5) при одноосном растяжении совпадает с теоретическим критерием (В.В.Новожилов и А.Г.Рыбакина О перспективах построения критерия прочности при сложном нагружении. Докл. III совещ. по механическим вопросам усталости. М.: ИМАШ, 1966. С.71-80).

$$\int KPdL = 1, \quad (6)$$

(где P – интенсивность микронапряжений, L – длина пути пластического деформирования), K – постоянная.

И тогда можно принять для одноосного растяжения:

$$P = (\sigma_p - \sigma_p'), \quad L = \int_0^{N_p} \delta dN \quad \text{и} \quad K = \frac{1}{\sigma_p^{ct} \varepsilon} \quad (7)$$

Проверка критерия (1) проводилась на большом числе материалов при растяжении-сжатии для различных сплавов в разных условиях нагружения: сталь 22к (мягкое нагружение при симметричном и асимметричном циклах: $r_\sigma = -1; -0,9; -0,7; -0,3$; жесткое нагружение, температура испытания до 450°C , образцы сплошные цилиндрические, трубчатые, без концентратора напряжений и плоские с концентратором напряжений), теплоустойчивая сталь ТС (мягкое и жесткое нагружение, $r_\sigma = -1; -0,9; -0,7; -0,3$ и 0 ; температура испытаний до

550⁰С, образцы сплошные и трубчатые, также плоские с концентратором напряжений), алюминиевый сплав АД-33 (мягкое и жесткое нагружение, образцы сплошные и трубчатые, $r_{\sigma}=-1$; 0 и +0,5), сталь 45 (мягкое и жесткое нагружение корсетных образцов, $r_{\sigma}=-1$), сталь 16ГНМА электрошлакового переплава (сплошные цилиндрические образцы, $r_{\sigma}=-1$), сталь ЧСН (сплошные образцы, $r_{\sigma}=-1$). Измерение деформаций осуществлялось как продольным, так и поперечным деформометрами. При этом статическое и циклическое нагружение проводилось в одних и тех же условиях и использовался один и тот же метод измерения деформаций на соответственно равных базах одинаковых образцов.

Суммирование энергий осуществлялось в виде

$$Q = \sum_0^{N_p} (\sigma_p \delta - \sigma'_p \delta'). \quad (8)$$

В качестве примера на рис. 1 приведены результаты обработки стали 22к, испытанной при симметричном цикле в условиях комнатной температуры.

Как видно из рис. 1,а, при простом суммировании площадей петель гистерезиса с увеличением долговечности предельно накопленная энергия возрастает, превышая статическую (полная площадь под кривой статического растяжения) в десятки раз. Обработка петель пластического гистерезиса этих экспериментальных данных в соответствии с уравнением (8) показала независимость предельно накопленной энергии от разрушающего числа циклов (рис. 1,б). Причем предельная величина накопленной энергии равна величине энергии статического разрушения, определяемого как $Q_{cr} = \sigma_p^{cr} \varepsilon$.

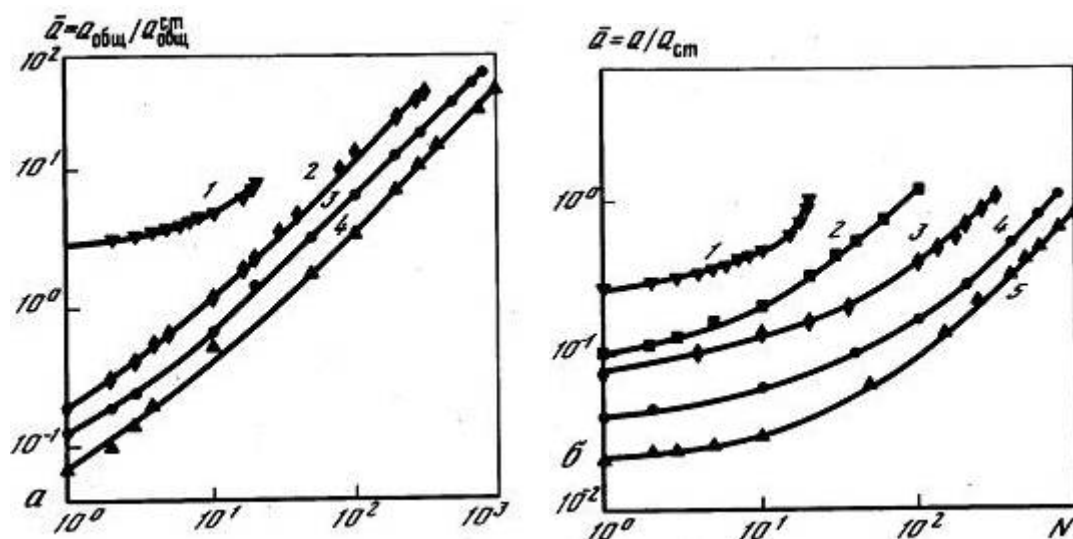


Рис.1. Зависимость суммарной поглощенной энергии (а) и суммарной энергии формоизменения с учетом обратимости пластической деформации (б) от числа циклов нагружения для стали 22к, $r_{\sigma} = -1$ (кривая 1 – образец предварительно тренирован при меньшей нагрузке).

Как показали данные измерений (рис.2), 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 окончательного разрушения [8]. 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 полупериоде растяжения всегда больше предела пропорциональности в полупериоде сжатия. Связано это прежде всего с тем, что при сжатии материал сильнее упрочняется, чем при растяжении, и в связи с этим ширина петли гистерезиса при мягком нагружении ($\sigma_a = \text{const}$) в полупериоде сжатия всегда меньше, чем в полупериоде растяжения, а потому и падение предела пропорциональности в полупериоде растяжения меньше, чем в полупериоде сжатия.

Важно в связи с этим отметить тот факт, что при исходном нагружении со сжатия (кривые 2 на рис.2) разность $\sigma_p - \sigma'_p$ имеет отрицательное значение. Однако уже во втором цикле она снова становится положительной. Если пластически деформированный образец получает отдых при перерывах на некоторое время, как это имело место в данных экспериментах, по мере накопления образцом односторонней деформации, то его предел пропорциональности в первом после отдыха полупериоде нагружения возрастает. Такое поведение предела пропорциональности может быть связано с некоторой релаксацией поля внутренних микронапряжений в процессе отдыха. Однако уже во втором цикле нагружения, следующем после отдыха, эффект последнего забывается, и поле внутренних микронапряжений восстанавливается.

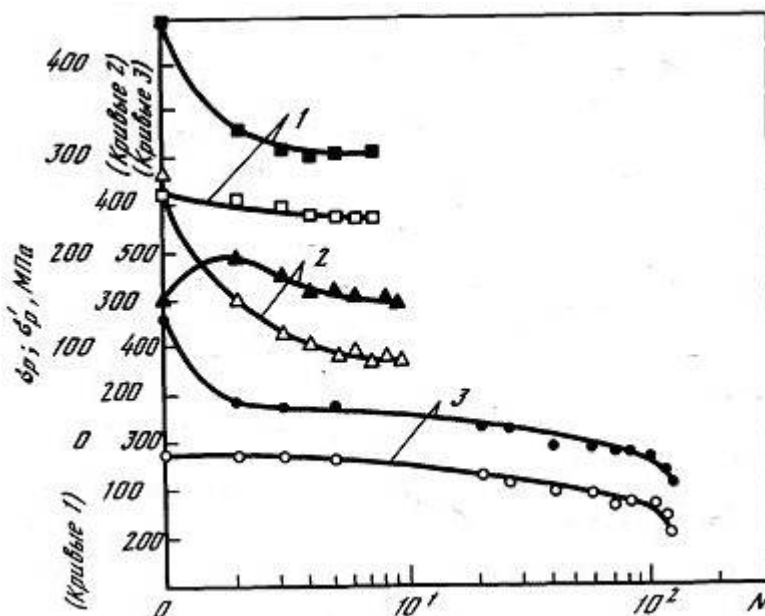


Рис.2. Изменение пределов пропорциональности в полупериодах растяжения σ_p (темные кружки) и сжатия σ'_p (светлые кружки) для стали ТС при мягком нагружении: 1 - $\sigma_a = 565$ МПа; 2 - $\sigma_a = 565$; 3 - $\sigma_a = 474$ МПа.

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 (кривые 2 для стали 22к на рис.3).

Для упрочняющегося материала пределы пропорциональности увеличиваются, а для разупрочняющегося – уменьшаются (соответственно кривые 1 для алюминиевого сплава АД-33 и кривые 3 для стали ТС на рис.3).

В соответствии экспериментальными данными между циклическим эффектом Баушингера, оцениваемого как $(\sigma_p - \sigma'_p) / \sigma_p^{ст}$, и шириной петли δ , отнесенной к предельной деформации при статическом разрушении ε (рис.4,а), существует линейная связь:

$$(\sigma_p - \sigma'_p) / \sigma_p^{ст} = \delta / \varepsilon. \quad (9)$$

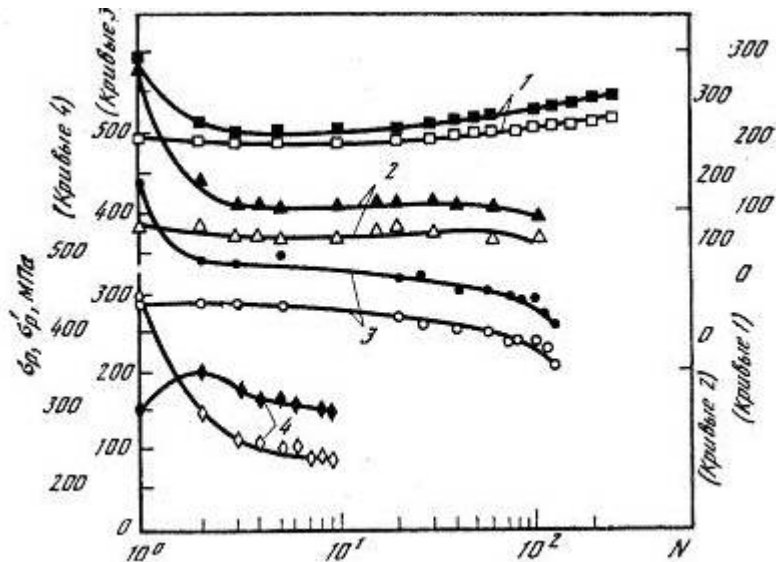


Рис.3. Изменение пределов пропорциональности алюминиевого сплава АД-33 (1), сталей 22к (2) и ТС (3): темные кружки – полуцикл растяжения, светлые – полуцикл сжатия (1 – АД-33, $\sigma_a = 298$ МПа; 2 – сталь 22к, $\sigma_a = 632$ МПа; 3 – сталь ТС, $\sigma_a = 474$ МПа; 4 – сталь ТС, $\sigma_a = 565$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

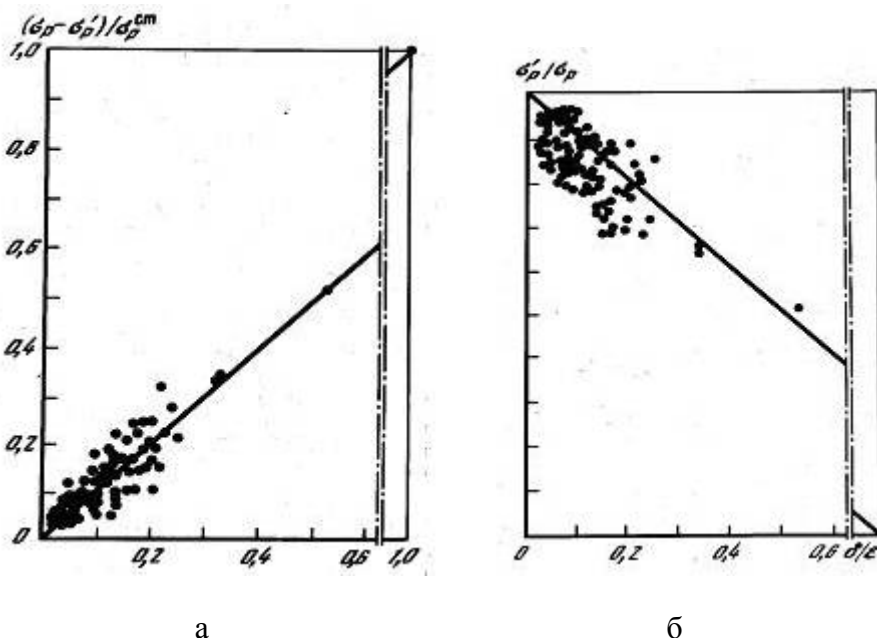


Рис.4. Корреляция между циклическим эффектом Баушингера (а), относительных пределов текучести

В уравнении (9) ε определяется, как предельная деформация перед потерей устойчивости пластической деформации [7].

Учитывая зависимость (9), уравнение (5) можно переписать в виде

$$\int_0^{N_p} \frac{\delta^2}{\varepsilon^2} dN = 1. \tag{10}$$

Принимая во внимание, что при жестком нагружении $\delta \approx \delta' = \text{const}$, можно зависимость (10) представить как

$$\frac{\delta^2}{\varepsilon^2} N_p = 1. \tag{11}$$

и тогда зависимость (5) с учетом зависимости на ε, δ может быть записана в виде

$$\int_0^{N_p} \frac{\delta^2}{\varepsilon^2} dN + \int_0^{N_p} \frac{(\delta - \delta')}{\varepsilon} dN = 1, \tag{12}$$

где $(\delta - \delta') = \Delta\varepsilon$ - односторонне накопленная за цикл деформация

Критерий (10) для жесткого нагружения совпадает с известным критерием Коффина и может быть записан как

$$\delta N_p^{0,5} = C \tag{13}$$

при $C = \varepsilon$.

Для некоторых материалов постоянная величина C в уравнении (13) оказалась равной $\varepsilon_{\text{ист}}/2$ (где $\varepsilon_{\text{ист}}$ - истинная деформация в шейке при статическом разрушении образца, определяемая через предельное поперечное сужение как

$$\varepsilon_{\text{ист}} = -\ln \frac{1}{1-\psi}.$$

Величина C при иных условиях деформирования может отличаться от величины, равной $\varepsilon_{\text{ист}}/2$.

На рис.5,а нанесены данные для большого числа материалов в широком диапазоне температур. Сопоставление рис.5,а и рис.5,б показывает, что при малоциковом (жестком) нагружении хорошие результаты дает расчет по предложенной зависимости (10).

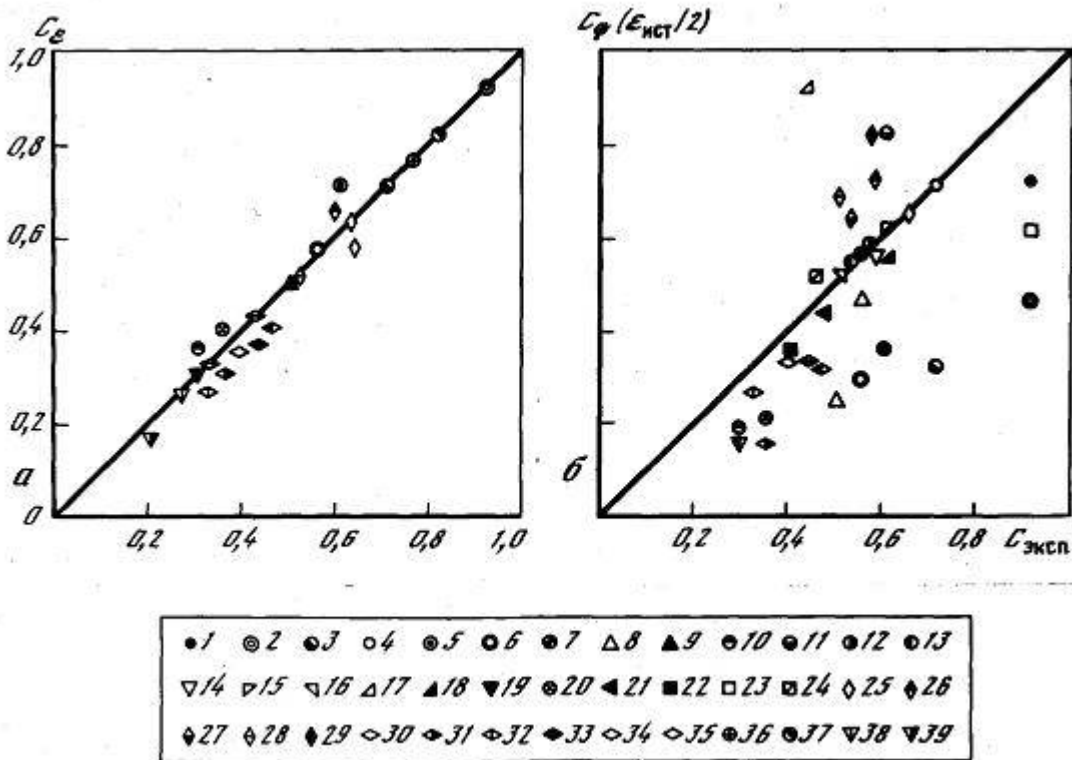


Рис.5. Корреляция удлинения $\varepsilon = C_\varepsilon$ (а) и постоянной Коффина C_ϕ (б) с экспериментальными данными (1- алюминиевый сплав Al-2S в отожженном состоянии; 2 – медь с отжигом; 3 – медь в

состоянии поставки; 4 – отожженная медь; 5- сталь SAE1018; 6 – титан; 7 – сплав Ni-Al в отожженном состоянии; 8 – сталь A151347; 9 – алюминиевый сплав Al 245-T; 10 - алюминиевый сплав Al 755-T; 11 – сталь 18-8; 12 сталь с 13:-ным содержанием хрома; 13 – Cr-Mo-сталь; 14 – сталь 18-8 при 300⁰C; 15 – хромистая сталь при 300⁰C; 16 – Cr-Mn-сталь при 300⁰C; 17 – Cr-Mo-сталь при 500⁰C; 18 – сталь 18-8 при 500⁰C; 19 – сплав Al+5%Mg; 20 – сплав ДТД5468; 21 – сталь En 2; 22 – сталь 908; 23 – сталь A-201; 24 – сталь En 2S; 25 – сталь TC при 20⁰C; 26 – сталь TC при 270⁰C; 27 – сталь TC при 350⁰C; 28 – сталь TC при 450⁰C; 29 – сталь TC при 550⁰C; 30 – сталь 22к при 20⁰C; 31 – сталь 22к при 150⁰C; 32 – сталь 22к при 270⁰C; 33 – сталь 22к при 350⁰C; 34 – сталь 22к при 450⁰C; 35 – сталь 22к электрошлакового переплава; 36 – сталь X18H10T, трубчатый образец; 37 – сталь X18H10T, цилиндрический образец; 38 – сталь 16ГНМ электрошлакового переплава; 39 – сталь ЧСН).

Как видно из рис.5,б, уравнение Коффина справедливо лишь в ограниченном диапазоне значений исходной пластичности металлических материалов. Наилучшее соответствие наблюдается для большинства материалов, пластичность которых ψ равна 60-70% (или $\epsilon_{ист} = 100 \div 120\%$).

Расчет долговечности по уравнению Коффина для материалов, у которых $\psi < 60\%$, дает заниженные, а при $\psi > 70\%$ - завышенные значения. Результаты расчета могут отличаться от экспериментальных данных в 4 раза. Анализируя экспериментальные результаты Коффина, можно отметить, что худшее соответствие предложенное им уравнение дает для материалов с малой исходной пластичностью (например, алюминиевые сплавы) – рис.5,б. В ряде случаев уравнению Коффина (при $C = \epsilon_{ист}/2$) не подчиняются отдельные материалы с высокой исходной пластичностью (как видно из рис. 5,б, отожженный Al-2S, медь, обжатая с диаметра 19,1 мм до диаметра 12,7 мм, сталь А-201). Для стали 18-8 ($\epsilon_{ист} = 1,6$) и для хромо-молибденовой стали (при температуре 500⁰C $\epsilon_{ист} = 1,8$) наблюдается значительное отклонение постоянной, определяемой как $\epsilon_{ист}/2$, от экспериментальной (рис.5,б).

Полученные автором экспериментальные данные для сталей TC и 22к при температурах до 550⁰C также показывают, что для стали 22к, обладающей меньшей пластичностью, чем сталь TC, величина $\epsilon_{ист}/2$ меньше значения C , которое определено из эксперимента. Наибольшее отклонение наблюдается для температуры испытания 270⁰C, при которой сталь 22к склонна к интенсивному деформационному старению. Сталь TC при повышенных температурах имеет $C = \epsilon_{ист}/2 > C_{эксп}$.

У материалов, имеющих хрупкий долом образца, при измерениях поперечным деформометром общее «удлинение» (поперечное) дает при пересчете в продольное истинную деформацию, и в этом случае уравнение Коффина (13) дает заниженные результаты (рис.5,б).

Действительно, если в экспериментальных данных Коффина (рис.5,б), имеющих малое ψ (алюминиевые сплавы, сталь А-201, нагартованная медь и др.), принять $C = \epsilon_{ист}$, то они хорошо соответствуют уравнению (10), определяющему долговечность через статическую деформацию (рис.5,а).

В уравнении (12) первый член определяет величину усталостного повреждения, а второй – повреждение от односторонне накопленной деформации к моменту разрушения (при квазистатическом, смешанном и усталостном разрушении).

Зависимости (11) и (12) были проверены на большом числе материалов и при различных условиях нагружения. Испытания были проведены при растяжении – сжатии с частотой от одного до 10 циклов в минуту в широком интервале температур. Для измерений деформаций использовались как продольные, так и поперечные деформометры. При этом были испытаны сплошные (цилиндрические и корсетные) и трубчатые образцы из котельной

стали 22к (при температурах 20-450⁰С и асимметриях -1, -0,9, -0,7 и -0,3, кроме того, образцы сварные и с надрезом), теплоустойчивой стали ТС (при температурах 20-550⁰С и асимметриях -1, -0,9, -0,7 и -0,3), жаропрочного никелевого сплава ЭИ-437Б (при 700⁰С), стали 16ГНМА, ЧСН, Х18Н10Т, сталь 45, алюминиевого сплава АД-33 (при асимметриях -1, 0, +0,5) и др. Все материалы испытывались в состоянии поставки.

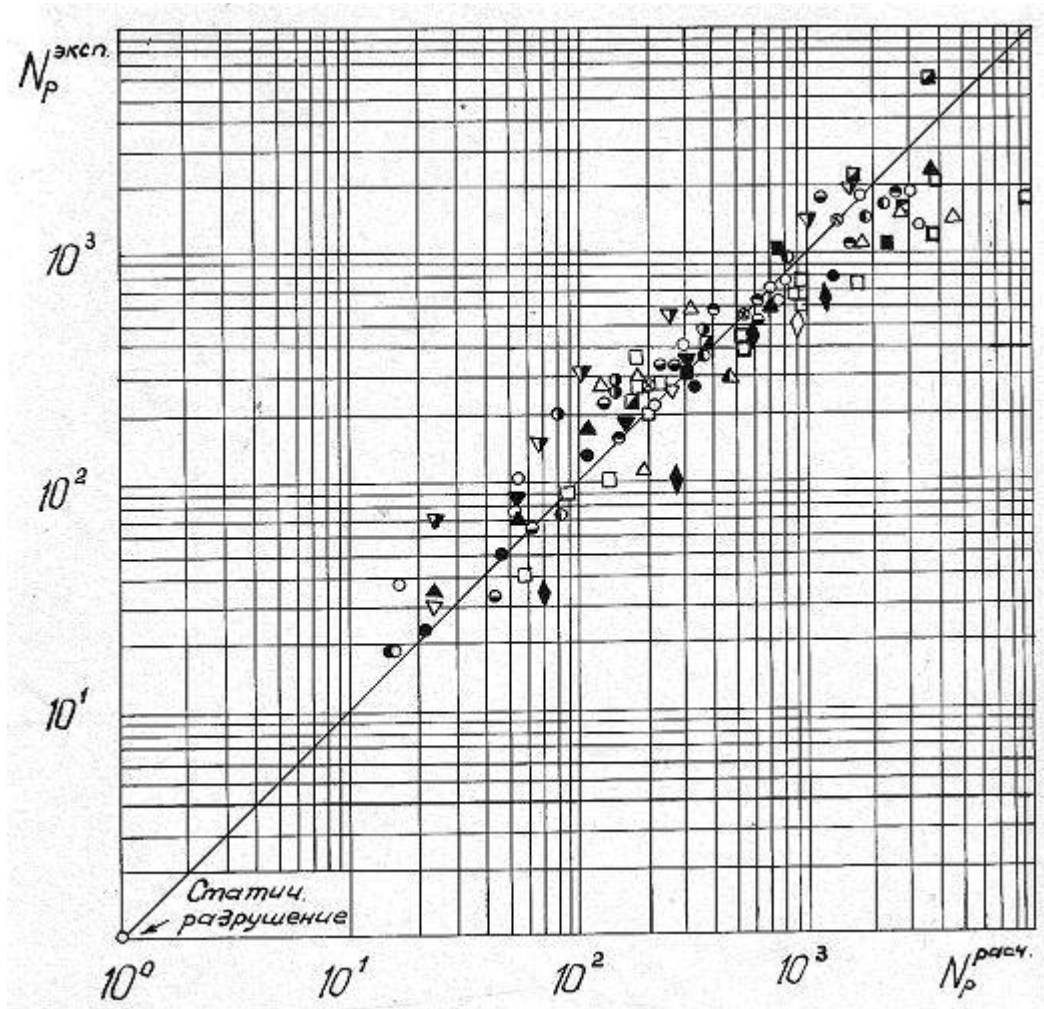
Обработка экспериментальных данных осуществлялась для жесткого нагружения в виде

$$\frac{\delta^2}{\varepsilon^2} N_p = 1, \tag{14}$$

для мягкого нагружения – в виде

$$\sum_0^{N_p} \frac{\delta^2}{\varepsilon^2} + \sum_0^{N_p} \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon} = 1. \tag{15}$$

Сопоставление экспериментальных и рассчитанных по уравнениям (14) и (15) данных показывает (рис.6 и рис.7), что они находятся в хорошем соответствии друг с другом.



11

Рис.6. Корреляция между рассчитанными и экспериментальными данными при жестком нагружении (1 - сталь 22к при 20⁰С; 2 – сталь 22к при 20⁰С, сварные образцы; 3 – сталь 22к при 350⁰С; 4 – сталь 22к при 150⁰С; 5 – сталь 22к при 450⁰С; 6 – сталь 22к при 270⁰С; 7 – сталь ЧСН-1; 8 – сталь ЧСН-VI; 9 – сталь 16ГНМА электрошлакового переплава при 20⁰С; 10 – сталь ТС при 20⁰С, образцы цилиндрические; 11 – сталь ТС при 20⁰С, образцы корсетные; 12 – сталь ТС при 270⁰С; 13 –

сталь ТС при 350⁰С; 14 – сталь ТС при 450⁰С; 15 – сталь ТС при 550⁰С; 16 – сталь Х18Н10Т, образцы трубчатые; 17 – сталь Х18Н10Т, образцы цилиндрические; 18 – сплав ЭИ-437Б при 700⁰С).

Максимальное отклонение расчетных и экспериментальных значений долговечности не превышает двух раз (за исключением нескольких образцов с большой долговечностью), что находится в пределах разброса экспериментальных данных, получаемых на материалах в состоянии поставки. Небольшое отклонение наблюдается у образцов, испытанных при высоких температурах (450⁰С для стали 22к и 550⁰С для стали ТС), когда материалы проявляют уже свои реологические свойства и повреждение материала происходит как от циклических нагрузок, так и от ползучести. Хорошее соответствие получено также в большом диапазоне степеней асимметрии цикла

Расчет по зависимостям (14) и (15) дал результаты, разброс которых находится в пределах разброса экспериментальных данных. Это, в свою очередь, отражает правомерность использования зависимостей (1) и (2) при выводе критериев (11) и (12).

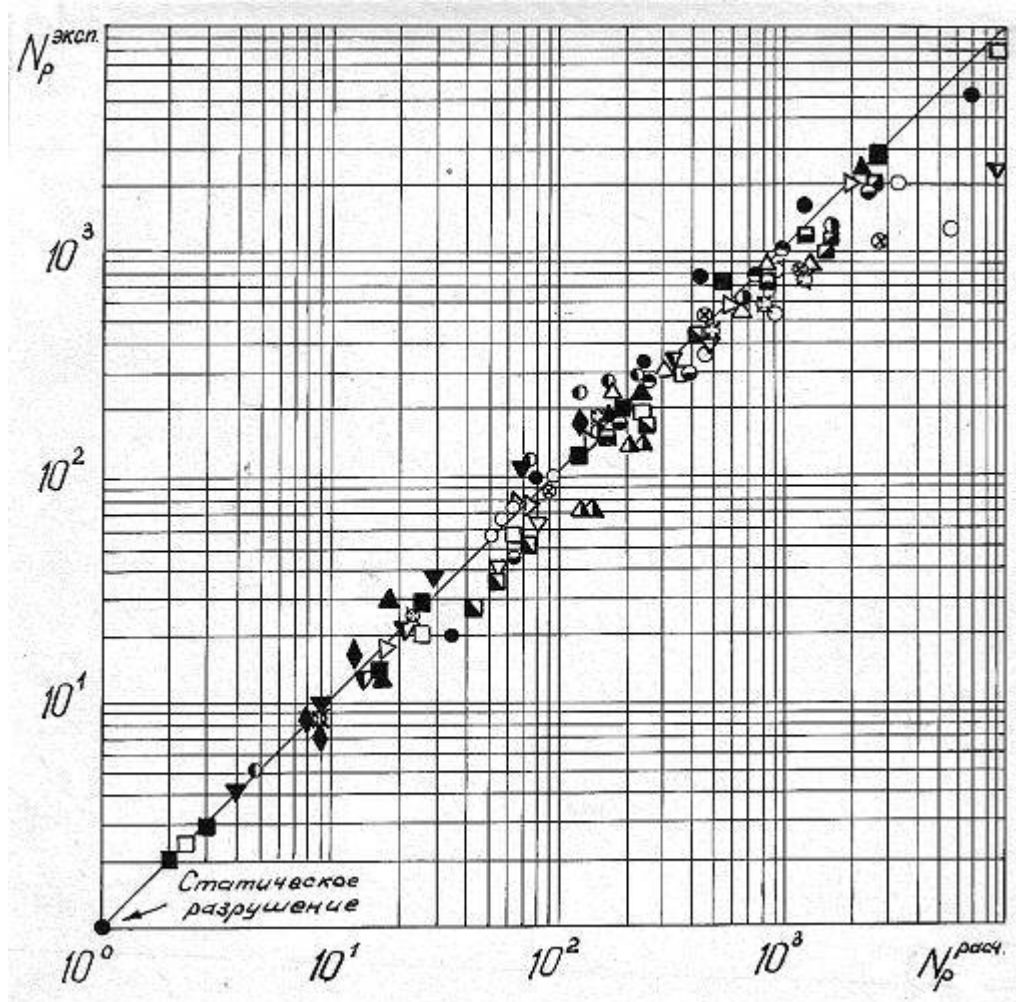


Рис. 7. Корреляция между расчетными и экспериментальными данными при мягком нагружении (1 – сталь 22к, $r_\sigma = -1$; 2 – сталь 22к, $r_\sigma = -0,7$; 3 – сталь 22к, $r_\sigma = -0,3$; 4 – сталь 22к, $r_\sigma = -1$, образцы с надрезом; 5 – сталь 22к, $T = 270^0\text{C}$; 6 – сталь 22к, $T = 350^0\text{C}$; 7 – сталь 22к, $T = 150^0\text{C}$; 8 – сталь 22к, $T = 450^0\text{C}$; 9 – сталь ЧСН, $r_\sigma = -1$; 10 – сталь ТС, $r_\sigma = -1$; 11 – сталь ТС, $r_\sigma = -0,7$; 12 – сталь ТС, $r_\sigma = -0,3$; 13 – сталь ТС, $r_\sigma = -0,9$; 14 – сталь ТС, $T = 450^0\text{C}$, $r_\sigma = -1$; 15 – сталь ТС, $T = 350^0\text{C}$, $r_\sigma = -1$; 16 – сталь ТС, $T = 270^0\text{C}$, $r_\sigma = -1$; 17 – сталь ТС, $T = 550^0\text{C}$, $r_\sigma = -1$; 18 – сталь 45, $r_\sigma = -1$; 19 – сплав АД-33, $r_\sigma = 0$, $r_\sigma = +0,50$).

Список литературы

1. Романов А.Н. Проблемы материаловедения в механике деформирования и разрушения на стадии образования трещин. Часть 1. Вестник научно-технического развития, №11, 2013, с.38-49.
2. Романов А.Н. Проблемы материаловедения в механике деформирования и разрушения на стадии образования трещин. Часть 2. Структурная и деформационная неоднородность конструкционных материалов и рассредоточенное трещинообразование. Вестник научно-технического развития, №1, 2014, с.37-54.
3. Романов А.Н. Проблемы материаловедения в механике деформирования и разрушения на стадии образования трещин. Часть 3. Микроструктурные особенности развития деформаций в конструкционных материалах при циклическом нагружении в интервале температур транскристаллитного разрушения. Вестник научно-технического развития, № 2, 2014, с.36-50.
4. Романов А.Н. Проблемы материаловедения в механике деформирования и разрушения на стадии образования трещин. Часть 4. Основные типы микроструктурных деформационных рельефов, образующихся в конструкционных материалах при циклическом нагружении в интервале температур интеркристаллитного разрушения. Вестник научно-технического развития, №3, 2014, с.31-58.
5. Проблемы материаловедения в механике деформирования и разрушения на стадии образования трещин. Часть 5. Энергия статического и циклического разрушения конструкционных металлических материалов. Вестник научно-технического развития, №9, 2014, с.10-30
6. Романов А.Н. Критерии усталостного разрушения. Инженерный журнал «Справочник. Приложение», М., 2007, №6, 35 с.
7. Романов А.Н. Разрушение при малоцикловом нагружении. М.:Наука. 1988, 280 с.
8. Романов А.Н. Гаденин М.М. Методы определения циклического эффекта Баушингера. Заводская лаборатория , 1972, Т. 38, №1, с. 99-102.