

УДК 621.539.43.001.24

ПРОБЛЕМЫ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ В МЕХАНИКЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ НА СТАДИИ ОБРАЗОВАНИЯ ТРЕЩИН

Часть 8. Критерии разрушения с учетом работы микронапряжений на пути упругой деформации при усталостном 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 представлений о разрушении как предельной работе остаточных напряжений на пути и упругой деформации получен энергетический кинетический критерий (критерии) в деформационных терминах, описывающий (с учетом работы и на пути пластической деформации) разрушение во всем диапазоне долговечностей (малоциклового и многоциклового усталости) на стадии образования трещин. Критерий позволяет оценивать уровни повреждения на любой стадии циклического нагружения. Экспериментально подтверждена справедливость критерия на многочисленных конструкционных материалах при различных условиях нагружения в широком интервале температур.

Ключевые слова: критерий разрушения, накопление повреждений, предельное состояние, малоциклового и многоциклового усталости, долговечность, остаточные микронапряжения.

Ранее на основе проведенных экспериментальных исследований [1-6], был получен деформационно-кинетический критерий, удовлетворительно описывающий предельное состояние (образование трещин) в области малоциклового разрушения, когда роль пластической составляющей для большинства конструкционных металлических материалов не велика [7] в виде:

для жесткого нагружения (нагружение с заданным размахом упругопластической деформации в цикле):

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

для мягкого нагружения (нагружение с заданной амплитудой нагрузки в цикле):

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

где $\Delta\varepsilon$ - односторонне накопленная за цикл деформация, δ – ширина петли соответственно в полциклах растяжения, ε - предельная деформация при статическом разрыве образца, N_p - разрушающее число циклов.

Принимая во внимание, что при жестком нагружении $\delta \approx \text{const}$, можно зависимость (1) представить как

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

Примечательная особенность уравнения (2) в отличие от существующих состоит в том, что оно учитывает кинетику ширины петли на всех стадиях разрушения с заданной амплитудой условного напряжения. В тех случаях, когда при жестком нагружении изменением ширины петли с увеличением числа циклов нагружения пренебречь нельзя, накопление повреждений может быть подсчитано либо по уравнению (1), либо по уравнению (2) с учетом накопленной деформации.

При переходе в область многоциклового усталости упругая составляющая при наличии пластической (неупругой) деформации начинает играть значительную роль в накоплении повреждений.

При выводе критериев малоциклового разрушения в расчет принималась лишь энергия пластической деформации и считалось, что измеряемый модуль упругости E и модуль разгрузки E_p в цикле равны и не изменяются с ростом числа циклов нагружения.

В действительности при циклическом упругопластическом деформировании уже при первом разгрузке и в последующих циклах при нагружении и разгрузке в упругой области имеет место нелинейность (рис.1), обусловленная действием остаточных микронапряжений [8,9]: при изменении нагрузки в сторону ее роста или убывания действуют дополнительно остаточные микронапряжения, обуславливая неупругое поведение материала.

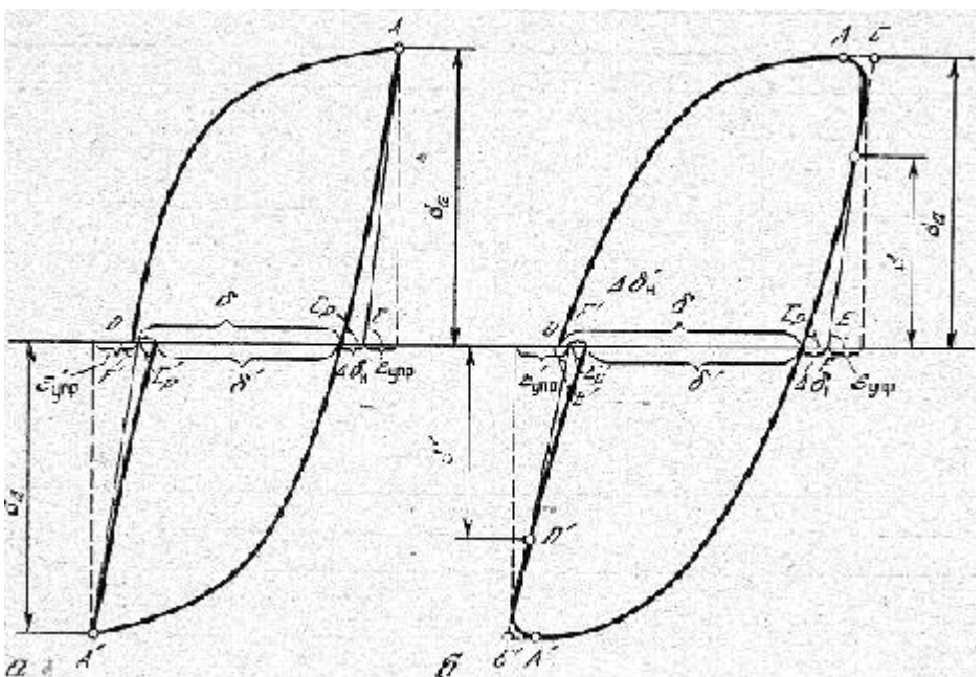


Рис.1. Формы петель пластического гистерезиса.

При нагружении до точки A (рис.1,а) и последующем снятии нагрузки в случае упругой разгрузки кривая, ограничивающая петлю гистерезиса, должна была бы следовать по прямой AF . Однако в силу того, что возникшие под действием пластической деформации остаточные микронапряжения, имеющие знак, противоположный знаку напряжений, которыми они были наведены, вызывают дополнительную упругую деформацию и тем самым нарушают линейность прямой разгрузки, т.е. разгрузка фактически протекает по кривой AB , определяющей модуль разгрузки E_p , который меньше упругого модуля E . В

результате имеет место неупругая деформация $\Delta\delta_n$, на величину которой уменьшается фактическая пластическая деформация в полцикле сжатия, с той лишь разницей, что при разгрузке со сжатия модуль разгрузки E'_p отличается от E_p растяжения, и в связи с этим $\Delta\delta_n \neq \Delta\delta'_n$, хотя это отличие может быть и небольшим.

Следует иметь в виду, что модуль разгрузки (или неупругая деформация $\Delta\delta_n$ и $\Delta\delta'_n$) изменяется от цикла к циклу.

При повышенных температурах или больших пластических деформациях в цикле при разгрузке в точке A (рис.1,б) происходит более быстрая, чем при комнатных температурах или малых пластических деформациях, релаксация внутренних микронапряжений, вызывающая уменьшение сопротивления деформированию материала, и кривая разгрузки приобретает резко выраженный криволинейный характер, в особенности в начальный момент разгружения (кривая AD на рис.1,б). Дальнейшее снижение активной нагрузки сопровождается затуханием релаксации остаточных микронапряжений, а действующая нагрузка уже настолько мала, что не может вызвать дополнительную пластическую деформацию и в точке D происходит равновесие активных напряжений σ и остаточных микронапряжений. Начиная с точки D , разрушение идет с опережением деформации, которая имела бы место, если бы разгрузка осуществлялась при отсутствии остаточных микронапряжений, т.е. по прямой DF , и в результате имеет место неупругая деформация $\Delta\delta_n$, определяемая отрезком BF . В последнем случае представляется затруднительным определение модуля разгрузки E_p , так как кривая ADB имеет непрерывный ярко выраженный криволинейный характер. В этом случае может быть определен некоторый осредненный модуль разгрузки следующим образом: через точку D проводится прямая CF под углом E , определяющим модуль упругости исходного материала, а затем точка C соединяется с точкой B , образуя прямую, наклон которой определяет осредненный модуль разгрузки, соответствующий неупругой деформации $\Delta\delta_n$.

Таким образом, измерив модуль разгрузки в полцикле растяжения E_p и в полцикле сжатия E'_p и зная амплитуду напряжения σ_a , можем определить неупругие деформации $\Delta\delta_n$ и $\Delta\delta'_n$:

$$\sigma_a = E\varepsilon_n; \quad (4)$$

$$\sigma_a = E_p(\varepsilon_y + \Delta\delta_n). \quad (5)$$

Решая уравнения (1) и (2), находим, что

$$\Delta\delta_n = \varepsilon_n \frac{(E - E_p)}{E_p}, \quad (6)$$

$$\Delta\delta'_n = \varepsilon'_y \frac{(E' - E'_p)}{E'_p}. \quad (7)$$

Величины δ , δ' , E_p , σ , $\Delta\delta_n$ и $\Delta\delta'_n$ являются функцией числа циклов нагружения.

Изменение неупругой деформации и модуля разгрузки с числом циклов нагружения для стали ТС представлено на рис.2,а и рис. 2,б соответственно.

Видно, что на первой стадии нагружения неупругая деформация и модуль разгрузки изменяются незначительно. С увеличением степени поврежденности материала указанные

характеристики интенсивно возрастают, достигая максимального изменения перед окончательным разрушением.

При разгрузке остаточные микронапряжения в полциклах растяжения и сжатия также совершают работу на пути неупругой деформации, которая определяется площадью треугольников ABF и $A'B'F'$ (рис.1,а), а в случае испытаний, когда имеет место релаксация напряжений – площадью BDF и $B'D'F'$ в полциклах растяжения и сжатия соответственно (рис.1,б).

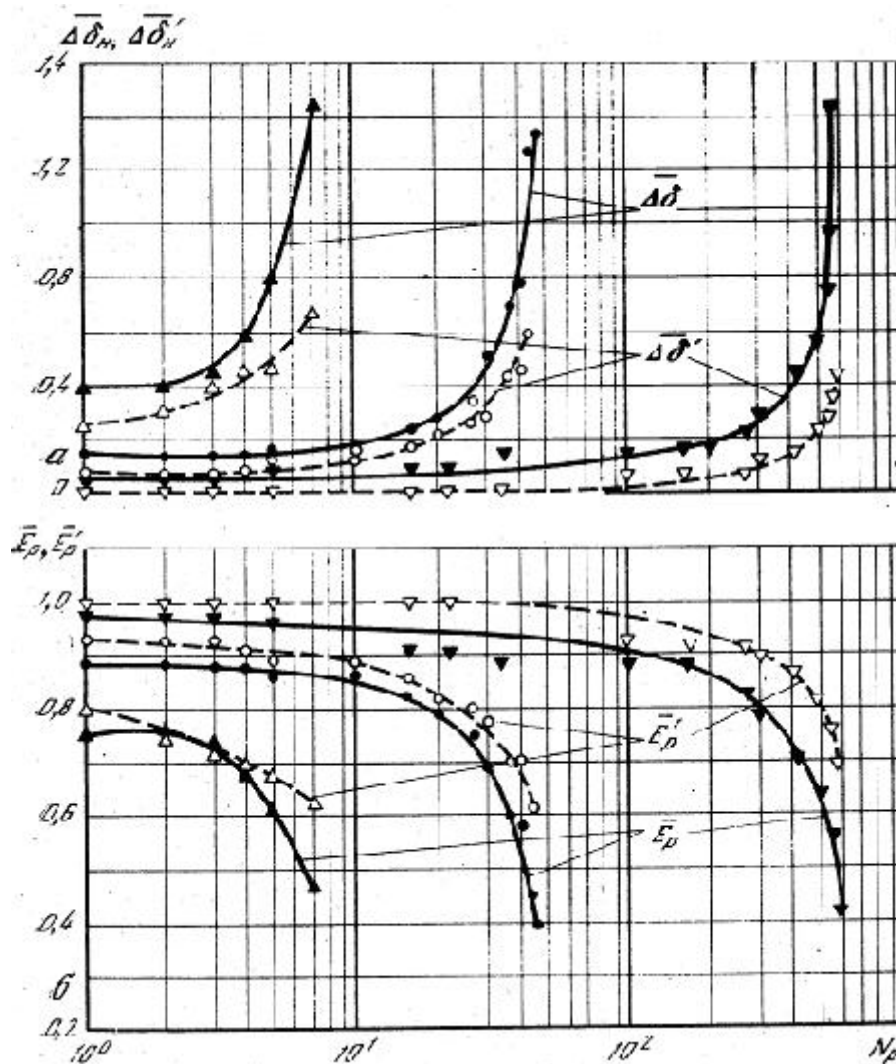


Рис.2. Характер изменения неупругой деформации и модуля упругости (при разгрузке) с ростом числа циклов нагружения.

Величина остаточных микронапряжений $\Delta\sigma$, обуславливающих эффект Баушингера, может быть определена через пластическую деформацию в цикле и предельную деформацию при статическом разрушении [6.8.9], когда неупругая деформация, вызванная остаточными микронапряжениями, определяется как

$$\Delta\delta = \frac{\sigma_p^{ст}}{E} \cdot \frac{\delta}{\varepsilon} = e_T \frac{\delta}{\varepsilon} = \frac{\sigma_p - \sigma'_p}{E} = \frac{\Delta\sigma}{E}, \quad (8)$$

и тогда с учетом работы микронапряжений на пути упругой деформации получаем [7]:

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

$$\int_0^{N_p} \frac{\delta^2}{\varepsilon^2} dN + \int_0^{N_p} \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon} dN + \int_0^{N_p} \frac{\sigma_a \delta}{E \varepsilon^2} dN = 1. \quad (10)$$

Поскольку $\sigma_a / E = e_y$ (e_y – упругая деформация в полцикле), то критерии соответственно для жесткого и мягкого нагружений в деформационных терминах запишем в виде

$$\int_0^{N_p} \frac{\delta^2}{\varepsilon^2} dN + \int_0^{N_p} \frac{e_y \delta}{\varepsilon^2} dN = 1, \quad (11)$$

$$\int_0^{N_p} \frac{\delta^2}{\varepsilon^2} dN + \int_0^{N_p} \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon} dN + \int_0^{N_p} \frac{e_y \delta}{\varepsilon^2} dN = 1 \quad (12)$$

Или

$$\int_0^{N_p} \frac{\delta e}{\varepsilon^2} dN = 1, \quad (13)$$

$$\int_0^{N_p} \frac{\delta e}{\varepsilon^2} dN + \int_0^{N_p} \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon} dN = 1, \quad (14)$$

где упругопластическая деформация $e = \delta + e_y$.

При жестком нагружении, когда ширина петли изменяется с ростом числа циклов нагружения незначительно, зависимость (13) может быть переписана в виде

$$\delta e N_p = const = \varepsilon^2. \quad (15)$$

Последняя зависимость является универсальной как для малого, так и для большого числа циклов (многоцикловая усталость) жесткого нагружения. Она же пригодна не только для условий циклического растяжения-сжатия, но и кручения, когда выбор предельной пластичности затруднен.

Критерии (13) и (14) позволяют определять уровни накопленных повреждений на любой стадии нагружения в виде:

при жестком нагружении

$$\eta = \int_0^N \frac{\delta e}{\varepsilon^2} dN, \quad (16)$$

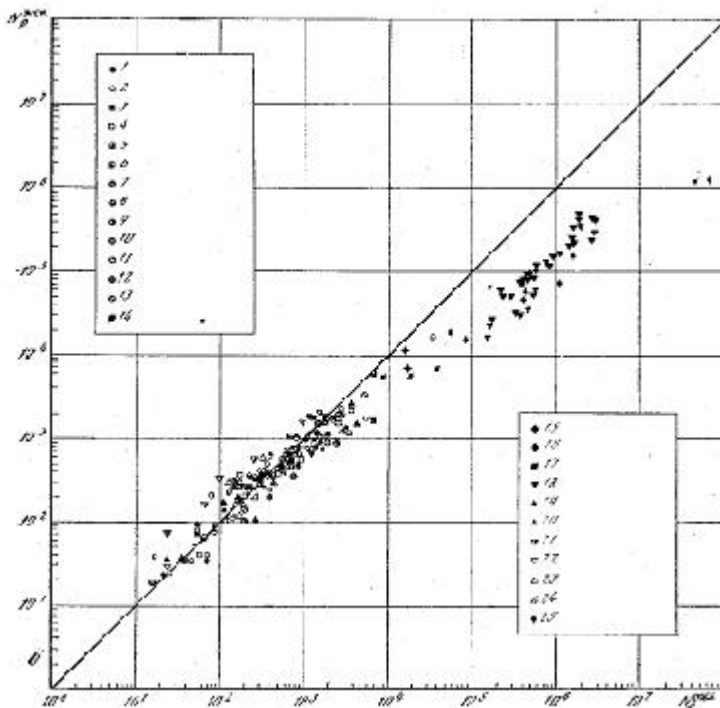
при мягком нагружении

$$\eta = \int_0^N \frac{\delta e}{\varepsilon^2} dN + \int_0^N \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon} dN, \quad (17)$$

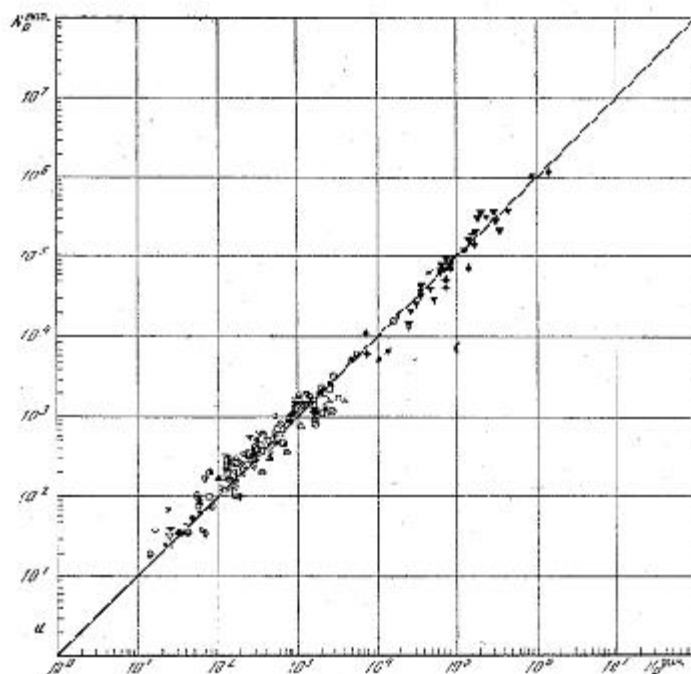
где N – текущее число циклов.

Проверка уравнений (13) и (14) показала их хорошее соответствие с экспериментом (рис.3 и рис.4). На рис.3 введены следующие обозначения: 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 4СН-1; 8 – сталь 4СН-VI; 9 – сталь 16ГНМА электрошлакового переплава при 20⁰С; 10 – сталь Х18Н10Т; 11 – сталь Х18Н10Т, Т = 550⁰С; 12 – сталь Х18Н10Т, Т = 450⁰С; 13 – сталь Х18Н10Т, Т = 250⁰С; 14 – сталь Х18Н10Т, Т = 650⁰С; 15 – сталь SAE4340; 16 – сталь SAE4340, предварительная тренировка; 17 – сталь SAE4340; 18 – сталь 45; 19 – сталь ТС при 20⁰С; 20 – сталь ТС при 270⁰С; 21 – сталь ТС при 350⁰С; 22 – сталь ТС при 450⁰С; 23 – сталь ТС при 550⁰С; 24 – сталь ТС, образцы с надрезом; 25 – сталь ЭИ-437Б при 700⁰С.



а)

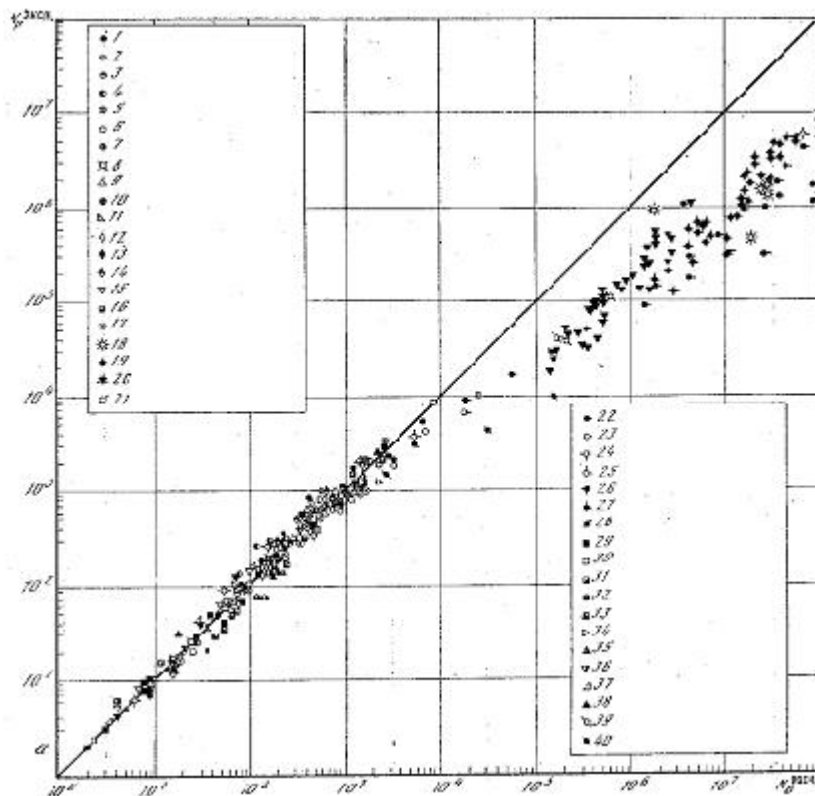


б)

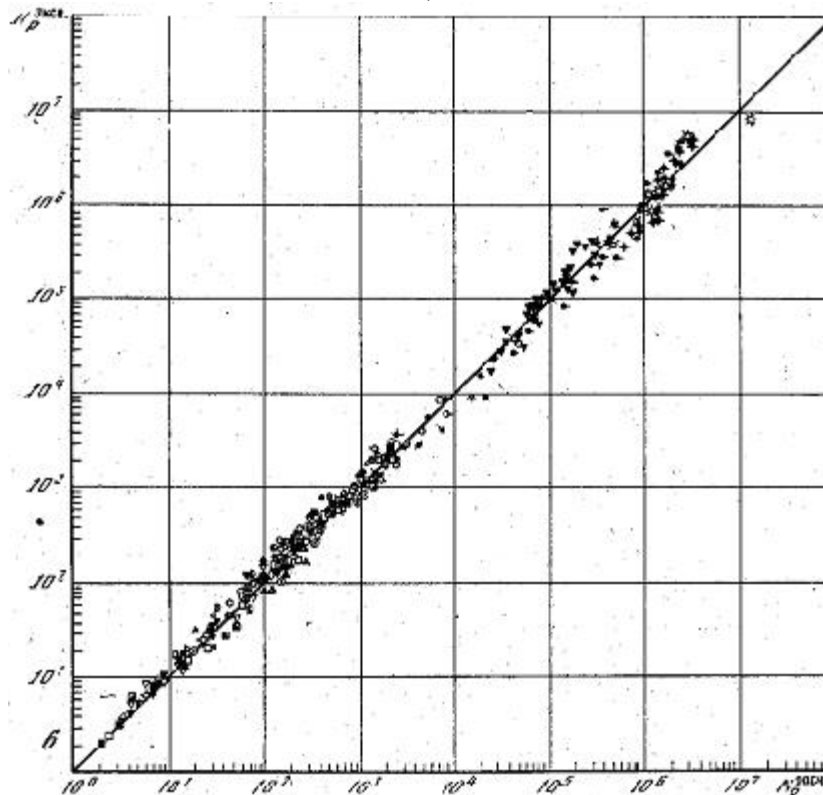
Рис.3. Сопоставление долговечностей, рассчитанных по уравнениям (2) и (14) с экспериментальными данными (соответственно а и б), полученными при мягком нагружении.

На рис. 4:

1 – сталь 22к; 2 – сталь 22к, $r_{\sigma} = -0,7$; 3 – сталь 22к, $r_{\sigma} = -0,3$; 4 – сталь 22к, образцы с концентратором; 5 – сталь 22к, $T = 270^{\circ}\text{C}$; 6 – сталь 22к, $T = 350^{\circ}\text{C}$; 7 – сталь 22к, $T = 150^{\circ}\text{C}$; 8 – сталь 22к, $T = 450^{\circ}\text{C}$; 9 – сталь 4СН; 10 – сталь 22к, $r_{\sigma} = -0,9$; 11 – сталь 16ГНМА электрошлакового переплава; 12 – сталь



а)



б)

Рис.4. Сопоставление долговечностей, рассчитанных по уравнениям (2) и (14) с экспериментальными данными (соответственно а и б), полученными при мягком нагружении.

X18H10T, $T = 450^{\circ}\text{C}$, программное нагружение; 13 – X18H10T, $T = 450^{\circ}\text{C}$, двухчастотное нагружение; 14 – X18H10T, $T = 450^{\circ}\text{C}$; 15 – X18H10T, $T = 650^{\circ}\text{C}$, программное нагружение; 16 – X18H10T, $T = 650^{\circ}\text{C}$, двухчастотное нагружение; 17 – 12 – сталь X18H10T, $T = 550^{\circ}\text{C}$; 18 – сталь с 0,22% C; 19 – сталь 1X13; 20 – сталь 45, двухступенчатое нагружение; 21 – сталь 1X13, двухступенчатое нагружение; 22 – сталь SAE4340, тренировка; 23 – SAE4340; 24 – Инконель 713C-LC; 25 – Инконель 713C-SG; 26 – Вaspалой BW; 27 – Вaspалой BK; 28 – Вaspалой A; 29 – сталь TC; 30 – сталь TC, $r_{\sigma} = -0,7$; 31 – сталь TC, $r_{\sigma} = -0,3$; 32 – сталь TC, $r_{\sigma} = -0,9$; 33 – сталь TC, $T = 450^{\circ}\text{C}$; 34 – сталь TC, $T = 350^{\circ}\text{C}$; 35 – сталь TC, $T = 270^{\circ}\text{C}$; 36 – сталь 45; 37 – сталь TC, образцы с надрезом; 38 – АД-33, $r_{\sigma} = 0; -1; +0,5$; 39 – Д16; 40 – Ni-Mo-сталь.

Как следует из уравнения (12), накопленное при циклическом нагружении повреждение суммируется из усталостного повреждения η_1 , определяемого как $\eta_1 = \int_0^{N_p} \frac{\delta^2}{\varepsilon^2} dN$,

квазистатического повреждения η_2 , определяемого как $\eta_2 = \int_0^{N_p} \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon} dN$, а также повреждения

от упругих напряжений (деформаций) как $\eta_3 = \int_0^{N_p} \frac{e_y \delta}{\varepsilon^2} dN$.

Следует иметь в виду, что доля каждого из повреждений $\eta_i - \eta_3$ зависит от уровня напряжений (деформаций): при долговечностях $N_p < 10^3$ циклов преобладающими являются η_1 и η_2 (при жестком нагружении $\eta_2 \approx 0$), при долговечностях $N_p > 10^3$ циклов $\eta_1 - \eta_3$ могут быть соизмеримы (рис.5). В области многоциклового усталости основным повреждением является повреждение η_3 (или η_3^*).

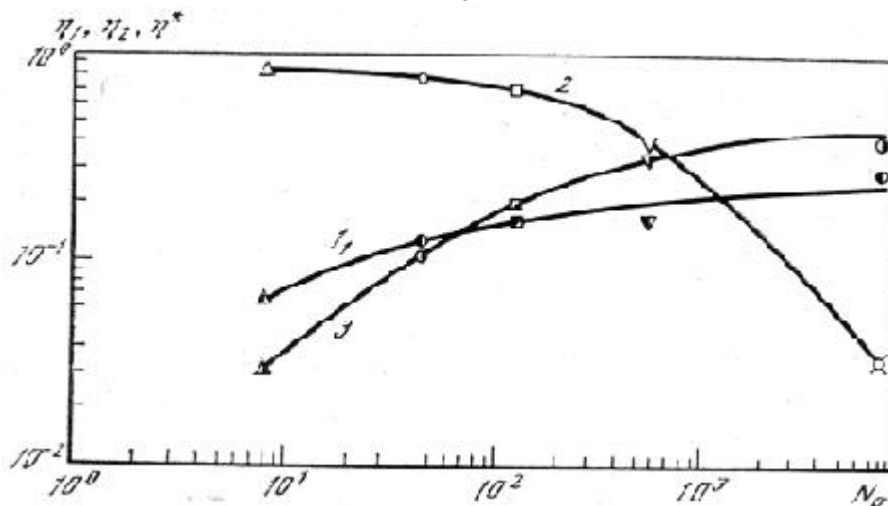


Рис.5. Зависимость предельно накопленных повреждений η_1 (1), η_2 (2) и η_3 (3) от долговечности стали TC.

Следовательно, условие разрушения может быть сформулировано следующим образом: разрушение наступает тогда, когда сумма усталостного η_1 , квазистатического η_2 повреждений и повреждения от микронапряжений η_3 достигает единицы:

$$\eta_1 + \eta_2 + \eta_3 = 1. \quad (18)$$

При жестком нагружении $\eta_2 = 0$ и условие разрушения записывается в виде

$$\eta_1 + \eta_3 = 1. \quad (19)$$

Таким образом, зависимости (13) – (14) описывают кинетику накопления повреждений, предельным случаем которого является появление макротрещины.

Критерии (13) и (14) являются кинетическими критериями, позволяющими определять повреждения на любой стадии нагружения.

Исследованиями показано, что существует единое правило суммирования повреждений при циклическом нагружении на основе предложенного кинетического критерия. При этом условия нагружения влияют на характеристики сопротивления деформированию, входящие в зависимости (13) и (14), 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 полциклах нагружения и т.д.).

Список литературы

1. Романов А.Н. Проблемы материаловедения в механике деформирования и разрушения на стадии образования трещин. Часть 1. Вестник научно-технического развития, Электронный журнал, <http://vntr.ru/>, №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, Электронный журнал, <http://vntr.ru/>, №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, Электронный журнал, <http://vntr.ru/>, №3, 2014, с.31-58.
5. Романов А.Н. 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, Электронный журнал, <http://vntr.ru/>, №9, 2014, с.10-30
6. А.Н. Романов 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. Вестник научно-технического развития, Электронный журнал, <http://vntr.ru/>, №4, 2015, с.32-41.
7. Проблемы материаловедения в механике деформирования и разрушения на стадии образования трещин: Часть 7. Накопление повреждений при малоцикловом нагружении, Вестник научно-технического развития, Электронный журнал, <http://vntr.ru/>, №5, 2015, с.15-24.
8. Романов А.Н. Критерии усталостного разрушения. Инженерный журнал «Справочник. Приложение», М., 2007, №6, 35 с.
9. Романов А.Н. Разрушение при малоцикловом нагружении. М.:Наука. 1988, 280 с.