

УДК 621.539.43.001.24

ПРОБЛЕМЫ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ В МЕХАНИКЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ НА СТАДИИ ОБРАЗОВАНИЯ ТРЕЩИН

Часть 13. Критерии разрушения при неоднородном напряженном состоянии.

© Александр Никитович Романов

ИМАШ РАН, Россия, Москва

alrom37@mail.ru

Аннотация: Показана возможность применения деформационно-кинетического критерия усталостного разрушения при использовании продольных деформаций, в том числе при наличии концентратора напряжений. На основе энергетического подхода получена связь между коэффициентами напряжений и деформаций при циклическом упругопластическом деформировании.

Ключевые слова: циклическое нагружение, упругопластическое деформирование, концентрация напряжений, продольные деформации, коэффициенты концентрации напряжений, деформаций и энергии, деформационно-кинетический критерий, накопление повреждений, предельные деформации.

MATERIALS SCIENCE PROBLEMS IN MECHANICS OF DEFORMATION AND DESTRUCTION AT A STAGE OF FORMATION OF CRACKS Part 13. Kinetics of true stresses and deformations at low-cyclic loading.

©A.N. Romanov

IMASH RAN, Russia, Moscow

alrom37@mail.ru

Summary: Possibility of application of deformation and kinetic criterion of fatigue failure when using longitudinal deformations, including in the presence of the concentrator of tension is shown. On the basis of power approach communication between coefficients of tension and deformations at cyclic elasto-plastic deformation is received.

Keywords: cyclic loading, elastic-plastic deformation, concentration of tension, longitudinal deformations, coefficients of concentration of tension, deformations and energy, deformation and kinetic criterion, accumulation of damages, limit deformations.

При циклическом упругопластическом деформировании конструкционных металлических материалов кинетика деформаций и напряжений являются основной характеристикой (упрочнение, разупрочнение, уровни накопления повреждений, повреждающей и рассеиваемой энергии) поведения материала и его деградации под действием переменной нагрузки [1-12]. Для образцов с концентратором напряжений (надрез, отверстие) изменение с ростом числа циклов нагружения измеряемой осредненной деформации (в том числе и пластической) на выбранной базе образца, включающей концентратор) так же, как и для образца без концентратора, зависит от условий нагружения и структурного состояния материала [13-14].

При этом изменения деформаций (усилий) образца с концентратором качественно повторяет поведение образца без надреза (отверстия).

Как и в условиях однородного напряженного состояния [5], при малоцикловом нагружении образцов с надрезом количество поглощенной материалом энергии является функцией долговечности образца (рис.1): чем выше долговечность, тем большее количество энергии поглощается образцом к моменту разрушения. При этом, как видно из рис.1, общее количество энергии может во много раз превышать энергию однократного разрушения, определяемую площадью под кривой статического растяжения образца с концентратором напряжений. Для образцов с надрезом осредненная деформация измеряется на некоторой базе, включающей надрез, и измерение при статическом и циклическом нагружении осуществляется на одной и той же базе.

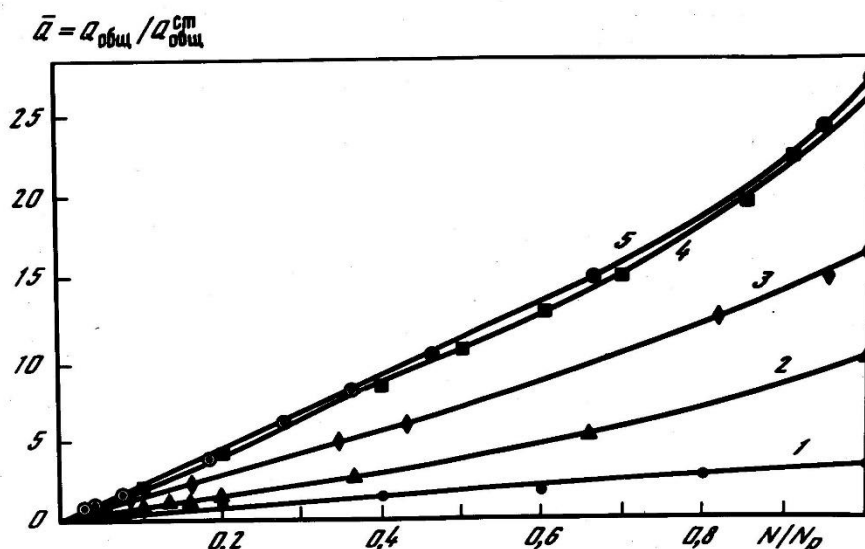


Рис.1. Зависимость поглощенной образцом энергии от числа циклов нагружения для стали 22к: 1 - $N_p = 5$, 2 - $N_p = 30$, 3 - $N_p = 116$, 4 - $N_p = 246$, 5 - $N_p = 276$ циклов

При неоднородном напряженном состоянии наличие надреза на образце (или детали) изменяет характер распределения энергии между отдельными объемами вследствие их неравномерного деформирования. В условиях однородного напряженного состояния до момента образования шейки (или трещины) распределение поглощаемой энергии является сравнительно равномерным (речь идет о некоторой средней величине энергии на любом макроучастке базы образца) [5], хотя и в условиях однородного напряженного состояния вследствие микронеоднородности развития деформаций поглощаемая энергия неодинакова для локальных объемов [1-5]. Неравномерность деформации в зоне надреза обуславливает и неравномерность распределения энергии между отдельными объемами. Причем, чем выше коэффициент концентрации напряжений (деформаций) в зоне надреза, тем выше эта неравномерность, и общее количество энергии, затрачиваемое на разрушение (определяемое площадью под кривой статического растяжения) для двух образцов, имеющих одинаковые номинальные сечения, меньше для образца, у которого выше коэффициент концентрации напряжений (острее надрез).

Ранее было показано, что для однородного напряженного состояния [5] при малоцикловом нагружении энергия предельного формоизменения равна энергии статического разрушения, если статическое и циклическое нагружения осуществляются при одних и тех же условиях (одна и та же скорость активного нагружения, одинаковая форма образцов, одна и та же база и метод измерения деформации и пр.). При этом разрушающая энергия в цикле определяется (как разность произведений циклических пределов пропорциональности σ_p и

σ'_p на пластические деформации δ и δ' в полуциклах растяжения и сжатия соответственно. При этом в предельном случае условие разрушения может быть описано зависимостями (1)-(3).

При этом условие разрушения может быть записано в виде [5]:

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

где $Q_{ст} = \sigma_p^{ст} \varepsilon$ - энергия статического разрушения.

Тогда

$$\int_0^{N_p} (\sigma_p \delta - \sigma'_p \delta) dN = \sigma_p^{ст} \varepsilon. \quad (2)$$

Для жесткого нагружения (с заданным размахом упругопластической деформации) кинетика петли практически не имеет места и можно принять $\delta = \delta' = const$. Тогда зависимость (2) может быть представлена в виде:

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

В зависимости (3) разность циклических пределов пропорциональности ($\sigma_p - \sigma'_p$) представляет собой циклический (в отличие от статического, определяемого в первом цикле) эффект Баушингера [5] в каждом цикле нагружения, а величина δ , суммируемая по числу циклов, есть своеобразный путь пластической деформации.

Зависимости (1)-(3) были проверены также для случая неоднородного напряженного состояния в условиях малоциклового нагружения при растяжении-сжатии (рис. 2).

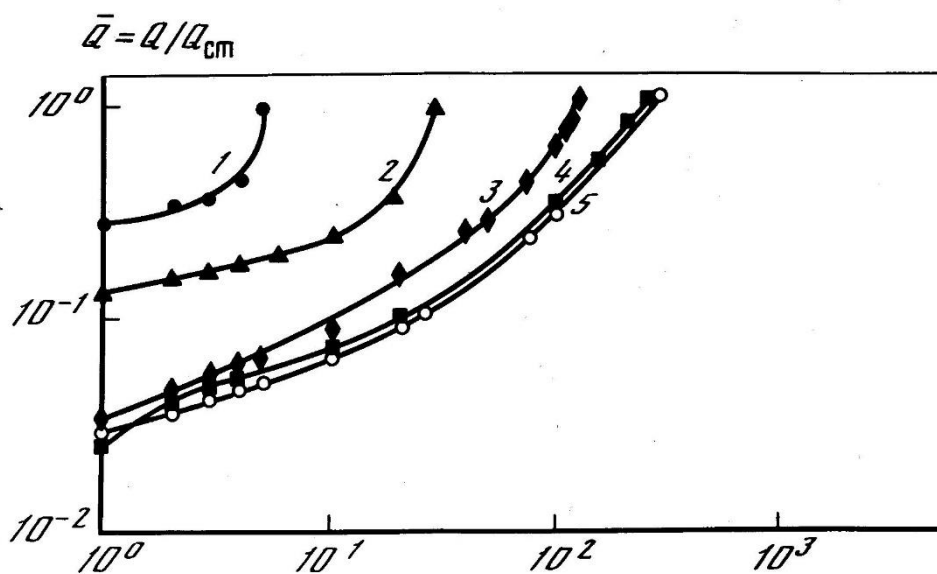


Рис. 2. Кинетика накопления разрушающей энергии с ростом числа циклов нагружения для стали 22к

При этом и статические характеристики (удлинение ε_n и предел пропорциональности $\sigma_{pH}^{ст}$), и циклические (ширина петли гистерезиса δ_n и δ'_n) определялись при измерении продольных деформаций на образцах с концентраторами напряжений (отверстие, надрез). Проверка зависимости (2) показала, что она хорошо согласуется с экспериментальными данными (рис.3), причем при неоднородном напряженном состоянии разброс экспериментальных точек меньше для материалов в состоянии поставки (образцы с надрезом были изготовлены из того же материала, что и образцы без надреза), чем при однородном.

Справедливость ранее описанного подхода по определению разрушающей доли энергии при статическом и циклическом разрушении металлических образцов в условиях однородного напряженного состояния и полученного ранее (с учетом циклического эффекта Баушингера) единого деформационно-кинетического критерия в виде [7] :

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

(где $(\delta - \delta') = \Delta\varepsilon$ - односторонне накопленная за цикл деформация, δ и δ' - ширина петли соответственно в полциклах растяжения и сжатия, ε - предельная деформация при статическом разрыве образца, N_p - число циклов до разрушения) подтверждает возможность применения критерия (4) и для неоднородного напряженного состояния.

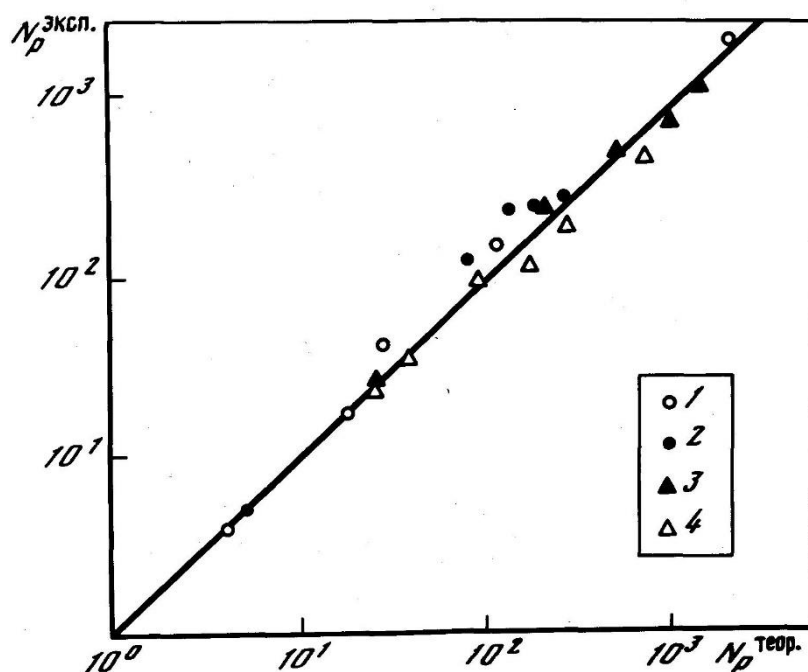


Рис.3. Связь расчетных данных с экспериментальными:
 1 – сталь ТС (образец с отверстием), мягкое нагружение;
 2 – сталь 22к (образец с надрезом), $R = 0,1$, мягкое нагружение;
 3 – сталь 22к (образец с отверстием), мягкое нагружение;
 4 – сталь ТС (образец с отверстием), жесткое нагружение.

Результаты расчетов в виде кривых усталости жесткого и мягкого деформирования для условий малого числа циклов нагружения представлены на рис.4.

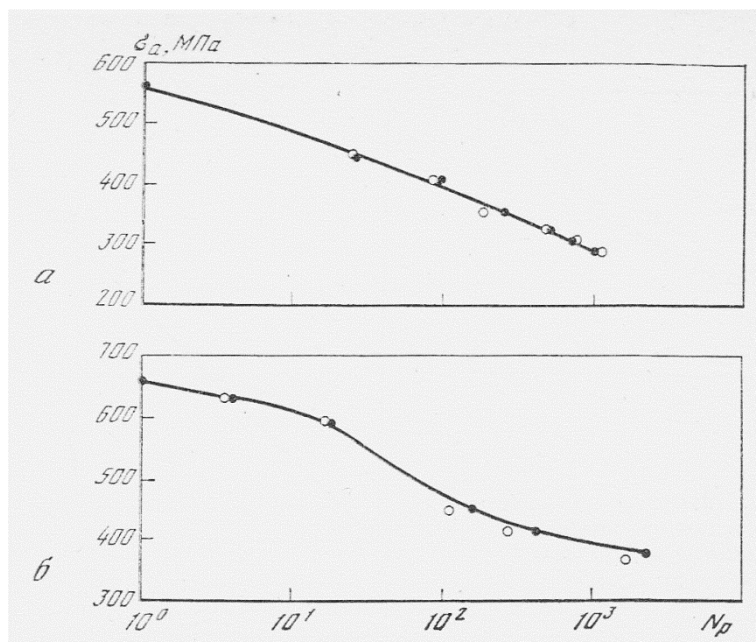


Рис.4. Экспериментальные и расчетные кривые усталости мягкого нагружения образцов с концентраторами из сталей 22к (а) и ТС (б) (темные точки- эксперимент, светлые – расчет по критерию (4)).

Следует иметь в виду, что критерий (4) справедлив для сколь угодно малых баз измерения деформаций, в том числе для малых баз. Однако для локальных местных деформаций, как было показано ранее [2-4], при расчетах накапливаемых повреждений по критерию (4) по осредненным макро-характеристикам следует учитывать локальную деформационную неоднородность.

Как показано выше, деформационно-кинетические критерии [2-4] позволяют, наряду с локальной структурной неоднородностью, учитывать и геометрическую неоднородность, обуславливающую концентрацию напряжений (деформаций).

При расчетах на прочность пользуются осредненными величинами (деформациями, напряжениями), которые при деформировании изменяются по особым закономерностям, позволяющим устанавливать между ними определенные связи. Измерение осредненных деформаций при неоднородном напряженном состоянии в виде общих удлинений (а не местных деформаций) также является правомерным для описания закономерностей, подобных зависимости (4) [2-4], поскольку эти зависимости предполагают сравнение образцов с одинаковым распределением энергии в деформируемых объемах. Это распределение определяется уровнем концентрации напряжений (деформаций).

Для образца с надрезом энергоемкость согласно (1) определяется формулой

$$Q_{стн} = \sigma_{рн}^{ст} \varepsilon_n, \quad (5)$$

где $\sigma_{рн}^{ст}$ и ε_n - предел пропорциональности и удлинение для образца с надрезом соответственно.

Справедливость критерия (4) как для однородного, так и для неоднородного напряженного состояния позволяет определить коэффициент концентрации энергии как

$$K_Q = \frac{Q_{ст}}{Q_{стн}} = \frac{\sigma_p^{ст} \varepsilon}{\sigma_{рн}^{ст} \varepsilon_n} \quad (6)$$

Если обозначим для одинаковых номинальных сечений и нагрузок $K_\varepsilon^* = \varepsilon / \varepsilon_n$,

$$K_\sigma^* = \sigma_p^{ст} / \sigma_{рн}^{ст}, \quad K_\sigma = \sigma_{рн} / \sigma_{ном} \quad (7)$$

и K_ε^* назовем осредненным коэффициентом концентрации деформации, а K_σ^* - осредненным коэффициентом концентрации напряжений, то зависимость (6) может быть переписана в виде:

$$K_Q = K_\varepsilon^* K_\sigma^* \quad (8)$$

При упругом деформировании коэффициент концентрации энергии может быть описан как

$$K_q = q_n / q, \quad (9)$$

где q_n и q – соответственно упругие энергии надрезанного и ненадрезанного образцов, определяемые как

$$q_n = (\varepsilon_n^2 E) / 2 = \sigma_n^2 / 2E \quad \text{и} \quad q = (\varepsilon^2 E) / 2 = \sigma^2 / 2E, \quad (10)$$

и тогда

$$K_q = \varepsilon_n^2 / \varepsilon^2 = \sigma_n^2 / \sigma^2 = \alpha_\varepsilon^2 = \alpha_\sigma^2 \quad (11)$$

Если принять, что $K_Q = K_q$ (т.е. коэффициенты концентрации энергий упругой и пластической деформаций для надреза равны) и подсчет коэффициентов концентрации K_σ^* и K_ε^* производится в условных местных деформациях и напряжениях (т.е. K_σ и K_ε), то получаем известную зависимость Нейбера, устанавливающую связь коэффициентов концентрации напряжений и деформаций при упругопластическом деформировании:

$$K_\sigma K_\varepsilon = \alpha_\sigma^2 = \alpha_\varepsilon^2 \quad \text{или} \quad (K_\sigma K_\varepsilon) / \alpha_\sigma^2 = (K_\sigma K_\varepsilon) / \alpha_\varepsilon^2 = 1. \quad (12)$$

Как и в случае деформационной неоднородности, обусловленной структурной неоднородностью [2-4], и в соответствии с зависимостями (5)-(10) для геометрической неоднородности (концентратора напряжений: надрез, отверстие) можно записать критерий (3) в виде:

$$\int_0^{N_p} (\sigma_{рн} \delta_n - \sigma'_{рн} \delta'_n) dN = \sigma_{рн}^{ст} \varepsilon_n, \quad (13)$$

(где индекс «н» обозначает, что образец с надрезом) или с учетом зависимости (6) в виде:

$$\int_0^{N_p} (\sigma_{pH} \delta_H - \sigma'_{pH} \delta'_H) dN = \frac{\sigma_p^{ст} \varepsilon}{K_Q}, \quad (14)$$

где $\sigma_p^{ст}$ и ε - характеристики образца без надреза.

Это означает, что расчет уровней накопленных повреждений и предельное состояние (образование трещины) образца (детали) может осуществляться по имеющимся деформационным характеристикам образца с концентратором напряжений для образца без концентратора при условии равенства нагрузок, номинального сечения и предельной пластичности ε при статическом разрушении, определяющей несущую способность материала [9]. И тогда критерий (4) для первого случая может быть записан в виде:

$$\int_0^{N_p} \frac{(K_\varepsilon^* \delta_H)^2}{\varepsilon^2} dN + \int_0^{N_p} \frac{(K_\varepsilon^* \Delta \varepsilon_H)^2}{\varepsilon^2} dN = 1, \quad (15)$$

или, если определение долговечности надрезанного образца осуществляется по циклическим характеристикам образца без надреза и статическим характеристикам надрезанного образца, тогда расчет производится в виде:

$$\int_0^{N_p} \frac{\delta^2}{(K_\varepsilon^* \varepsilon_H)^2} + \int_0^{N_p} \frac{\Delta \varepsilon^2}{(K_\varepsilon^* \varepsilon_H)^2} dN = 1. \quad (16)$$

Для жесткого режима нагружения (нагружение с заданным размахом упругопластической деформации) второй член в зависимостях (4)-(16) равен нулю.

Таким образом, обработка экспериментальных данных по зависимостям (14)-(15) показала возможность определения осредненных характеристик сопротивления деформированию образца с концентратором напряжений по характеристикам образца без надреза (и наоборот) как для жесткого, так и для мягкого нагружения, используя также характеристики статического разрушения надрезанного образца, полученные при тех же условиях нагружения.

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. 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. №9, 2014, с.10-30.
6. Романов А.Н. 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, № 3, 2015, с. 32-41.
7. Романов А.Н. Проблемы материаловедения в механике деформирования и разрушения на стадии образования трещин. Часть 7. Накопление повреждений при малоцикловом нагружении. Вестник научно-технического развития, № 5, 2015, с.15-24.
8. Романов А.Н. 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. Вестник научно-технического развития, № 6, 2015, с.31-39.
9. Романов А.Н. Проблемы материаловедения в механике деформирования и разрушения на стадии образования трещин. Часть 9. Малоцикловая усталость конструкционных металлических материалов. Вестник научно-технического развития, № 12, 2015, с.42-62.
10. Романов А.Н. Проблемы материаловедения в механике деформирования и разрушения на стадии образования трещин. Часть 10. Сопротивление малоцикловому деформированию и разрушению в связи с формой цикла и деформационным старением материала, № 1, 2016.
11. Романов А.Н. Проблемы материаловедения в механике деформирования и разрушения на стадии образования трещин: Часть 11. Структурные параметры деформационного старения при высокотемпературном малоцикловом разрушении. Вестник научно-технического развития, №3, 2016. с.27-37.
12. Романов А.Н. Проблемы материаловедения в механике деформирования и разрушения на стадии образования трещин: Часть 12. Кинетика истинных напряжений и деформаций при малоцикловом нагружении. Вестник научно-технического развития, №, 2016. с.16-22.
13. Романов А.Н. Разрушение при малоцикловом нагружении. М., Наука. 1988, 280 с.
14. Романов А.Н. Критерии усталостного разрушения. Инженерный журнал «Справочник», Приложение, 2007, №6, 36 с.