

УДК 621.539.43.001.24

ПРОБЛЕМЫ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ В МЕХАНИКЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ НА СТАДИИ ОБРАЗОВАНИЯ ТРЕЩИН.

Часть 7. Накопление повреждений при малоцикловом нагружении.

© Александр Никитович РОМАНОВ

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

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

alrom37@mail.ru

В обоснование разработанного деформационно-кинетического критерия оценки уровней накопленных повреждений на любой стадии малоциклового нагружения и описания предельного состояния (образования трещины) выполнены экспериментальные исследования для различных по деформационному поведению металлических материалов (циклически упрочняющиеся, разупрочняющиеся и стабилизирующиеся стали с ростом числа циклов нагружения). Показано, что поведение материала определяет и кинетику накопления повреждений. Установлено, что в области малоциклового нагружения критерий хорошо описывает долговечность материала при различных уровнях нагружения, в том числе в условиях программного нагружения. Замечено, что с ростом числа циклов до разрушения более 10^3 циклов отклонение от эксперимента рассчитанных по критерию долговечностей возрастает.

Ключевые слова: критерий разрушения, накопление повреждений, программное нагружение, предельное состояние, малоцикловая область, долговечность, асимметричное нагружение, циклическое поведение материалов.

Ранее [1-8] на основе характера поведения конструкционного материала при циклическом упругопластическом нагружении были получены энергетические (в деформационных терминах) кинетические критерии, позволяющие оценивать накопленное повреждение в каждом цикле, суммарное повреждение на любой стадии нагружения и предельное состояние (образование трещины) 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):

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

или

$$\int_0^{N_p} \frac{\delta^2}{\varepsilon^2} dN + \int_0^{N_p} \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon} dN = 1, \quad (3)$$

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 - разрушающее число циклов.

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

$$\frac{\delta^2}{\varepsilon^2} N_p = 1. \quad (4)$$

Примечательная особенность уравнения (3) 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 (3) с учетом накопленной деформации.

Согласно соотношению (3) общее накопленное повреждение складывается из усталостного повреждения

$$\eta_1 = \int_0^{N_p} \frac{\delta^2}{\varepsilon^2} dN \quad (5)$$

и квазистатического, вызванного односторонним накоплением пластической деформации при циклическом нагружении,

$$\eta_2 = \int_0^{N_p} \frac{(\delta - \delta')(\varepsilon - \delta)}{\varepsilon^2} dN. \quad (6)$$

где N - текущее число циклов.

Вклад того и другого повреждений на разных стадиях деформирования вследствие изменения ширины петли гистерезиса и величины накопленной деформации с ростом числа циклов нагружения не одинаков.

Для разупрочняющихся материалов, например для стали ТС, на начальной стадии нагружения в цикле имеют место малые накопления обоих видов (рис.1,а). Причем в первые циклы нагружения вследствие упрочнения материала повреждение за цикл уменьшается. При этом повреждение η'' от накопленной деформации в цикле в случае малых долговечностей (в области квазистатического типа разрушения) меньше, чем усталостное повреждение η' цикл. При больших долговечностях в первых циклах повреждение η'' может на несколько порядков отличаться от усталостного η' (при больших долговечностях накопление деформаций за цикл в начале нагружения практически отсутствует; на рис.1,а предполагаемый ход накопления повреждения η'' показан штриховыми линиями). С ростом циклов нагружения для стали ТС накопление повреждений η' и η'' резко увеличивается по сравнению с исходным значением, и на заключительной стадии разрушения повреждение η' может на три порядка отличаться от повреждения в нулевом полцикле (на рис.1,а). Повреждение η'' в таком случае возрастает еще более интенсивно. Кинетика петли и односторонне накопленной пластической деформации при мягком нагружении обуславливают неравномерность накопления повреждений по числу циклов нагружения (рис.1,б), которая учитывается при определении повреждения по уравнению (3).

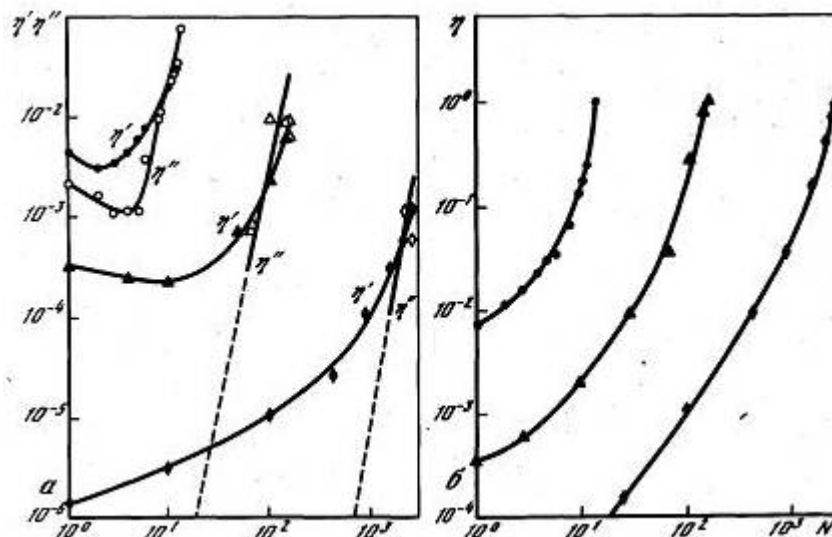


Рис.1. Зависимость накопления усталостного η' (темные точки) и квазистатического η'' (светлые точки) повреждений за цикл (а), а также суммарного повреждения η (б) от числа циклов нагружения ($r_\sigma = -1$) разупрочняющейся стали ТС.

Для упрочняющегося материала АД-33 величина усталостного и квазистатического повреждений в цикле является максимальной на первой стадии нагружения. С ростом числа циклов нагружения она убывает, и только в последние несколько циклов нагружения значение накопленной за цикл деформации увеличивается (рис.2,а). При этом в первом цикле $\eta'' > \eta'$. Общее повреждение упрочняющегося материала (рис.2,б) с ростом числа циклов нагружения повышается менее интенсивно, чем разупрочняющегося (рис.1,б).

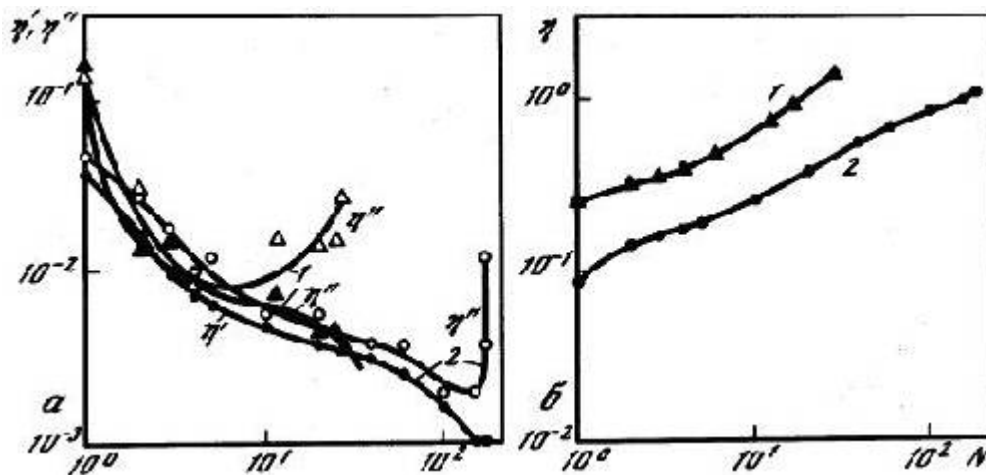


Рис.2. Накопление усталостного η' (темные точки) и квазистатического η'' (светлые точки) повреждений за цикл (а), а также суммарного повреждения η (б) сплава АД-33.

Циклически стабилизирующаяся сталь 22к лишь в первые и последние циклы деформирования характеризуется нестабильностью накопления повреждения η' (рис.3,а). Вследствие стабилизации петли гистерезиса повреждение за цикл η' на большей стадии нагружения остается практически постоянным. При этом накопленная за цикл деформация носит прогрессирующий характер и величина повреждения η'' , накопленного за цикл, с ростом числа циклов увеличивается. Суммарное повреждение стали 22к (рис.3,б)

повышается интенсивнее, чем упрочняющегося материала АД-33 (рис.2,б), но слабее, чем разупрочняющейся стали ТС (рис.1,б).

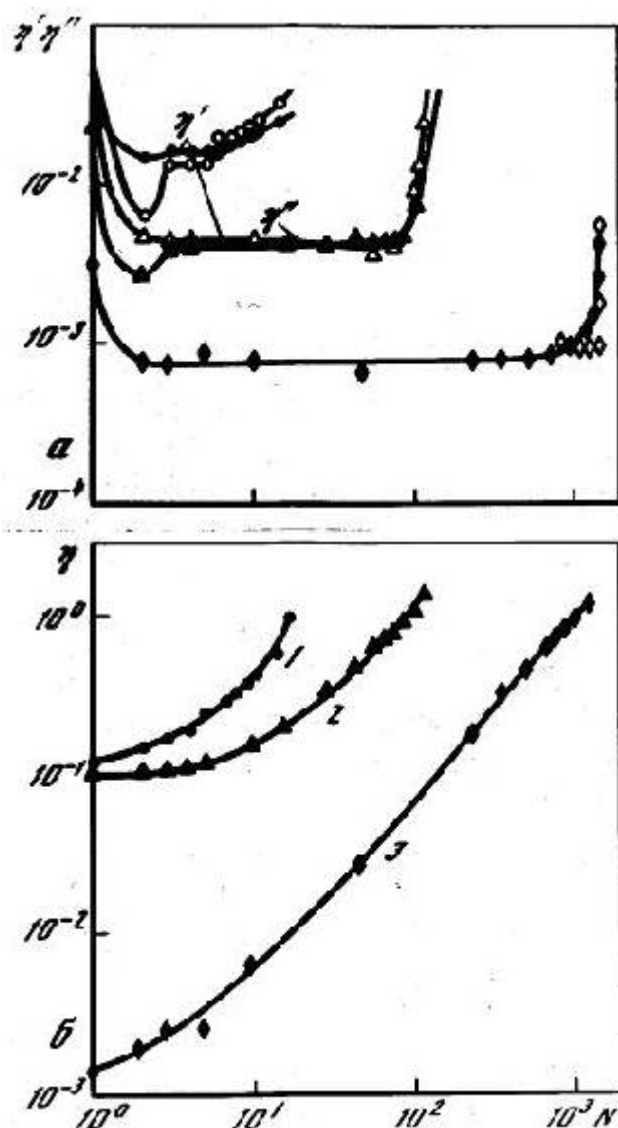


Рис.3. Накопление усталостного η' (темные точки) и квазистатического η'' (светлые точки) повреждений за цикл (а), а также суммарного повреждения η (б) стали 22к.

На основной стадии нагружения, по которой определяется тип материала, при малых долговечностях и больших уровнях напряжений усталостное и квазистатическое повреждения в цикле соизмеримы (рис.1 – 3). Однако при квазистатическом разрушении предельно накопленное повреждение определяет не их сумма, составляющая лишь несколько процентов, а повреждение от деформации, накапливаемой в один или несколько последних циклов, которая практически достигает деформации однократного разрушения. На рис.1,а; 2,а и 3,а стадии окончательного разрушения не показаны, поскольку тип материала определяется по поведению в промежуточной фазе.

Таким образом, в зависимости от типа материала интенсивность накопления повреждений на разных стадиях нагружения различна (рис.4). Для упрочняющегося материала АД-33 характерно большое накопление повреждений в начале нагружения (кривая 1), в то время как для разупрочняющейся стали сильно накапливаются повреждения на стадии окончательного разрушения ($N/N_p > 0,7$) – кривая 3. Интенсивность накопления

повреждений для циклически стабилизирующейся стали 22к сравнительно равномерно увеличивается с ростом числа циклов нагружения (кривая 2).

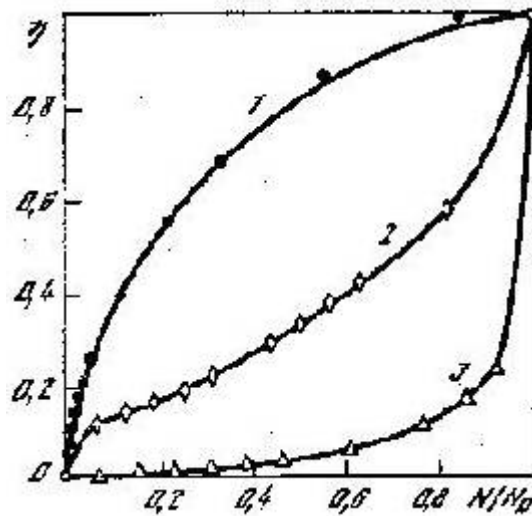


Рис.4. Характер интенсивности (темпа) накопления повреждений при малоцикловом нагружении упрочняющегося (кривая 1, алюминиевый сплав АД-33), разупрочняющегося (кривая 3, сталь ТС) и циклически стабильного (кривая 2, сталь 22к) материала.

В зависимости от величины действующей нагрузки при мягком нагружении в общем повреждении превалирует либо усталостное, либо статическое повреждение, определяемые соответственно по зависимостям (5) и (6). Для квазистатического разрушения (при малых долговечностях) определяющим является повреждение от накопленной деформации (рис.5). При больших долговечностях разрушение (усталостный тип) происходит от накопленного циклического повреждения. В тех случаях, когда имеет место разрушение смешанного типа (к моменту разрушения материал накапливает некоторое количество остаточной деформации с образованием шейки, а окончательное разрушение происходит в результате распространения усталостных трещин), накопленные усталостное и квазистатическое повреждение соизмеримы. Причем долговечности, при которых указанные виды накопленных повреждений одинаковы, определяются также типом материала и его структурным состоянием: чем материал пластичнее и более склонен к одностороннему накоплению пластической деформации, тем больше точка пересечения повреждений η_1 и η_2 сдвигается вправо (рис.5). Если для стали 22к эта точка соответствует числу циклов около 30 (рис.5,а), то для более пластической стали ТС – 300 циклам (рис.5,б) при симметричном цикле нагрузки.

Известно, что увеличение асимметрии цикла в сторону растяжения способствует росту накопленной деформации к моменту разрушения (при одних и тех же значениях максимальной амплитудной нагрузки при симметричном и асимметричном циклах) и тем самым повышает долю статического повреждения в общем накопленном.

Действительно, как видно из рис.5, при асимметрии $r_\sigma = -0,9$, точка пересечения кривых η_1 и η_2 (когда усталостное и статическое повреждения при окончательном разрушении равны) сдвигается вправо и уже соответствует долговечности примерно 500 циклам. Для стали ТС этот сдвиг еще более значителен и $\eta_1 = \eta_2 = 0,5$ соответствует долговечности в $2 \cdot 10^3$ циклов. При $r_\sigma = -0,7$ равенство усталостного и статического повреждений для указанных сталей наблюдается при долговечностях более 10^4 циклов. Соответственно увеличение асимметрии до $r_\sigma = -0,3$ еще больше сдвигает вправо указанную точку, и доля усталостного повреждения, например для $N_p = 10^3$ циклов, составляет 3-5% общего значения. Для пульсирующего цикла доля усталостного повреждения при долговечностях до 10^4 циклов, по-видимому, мала.

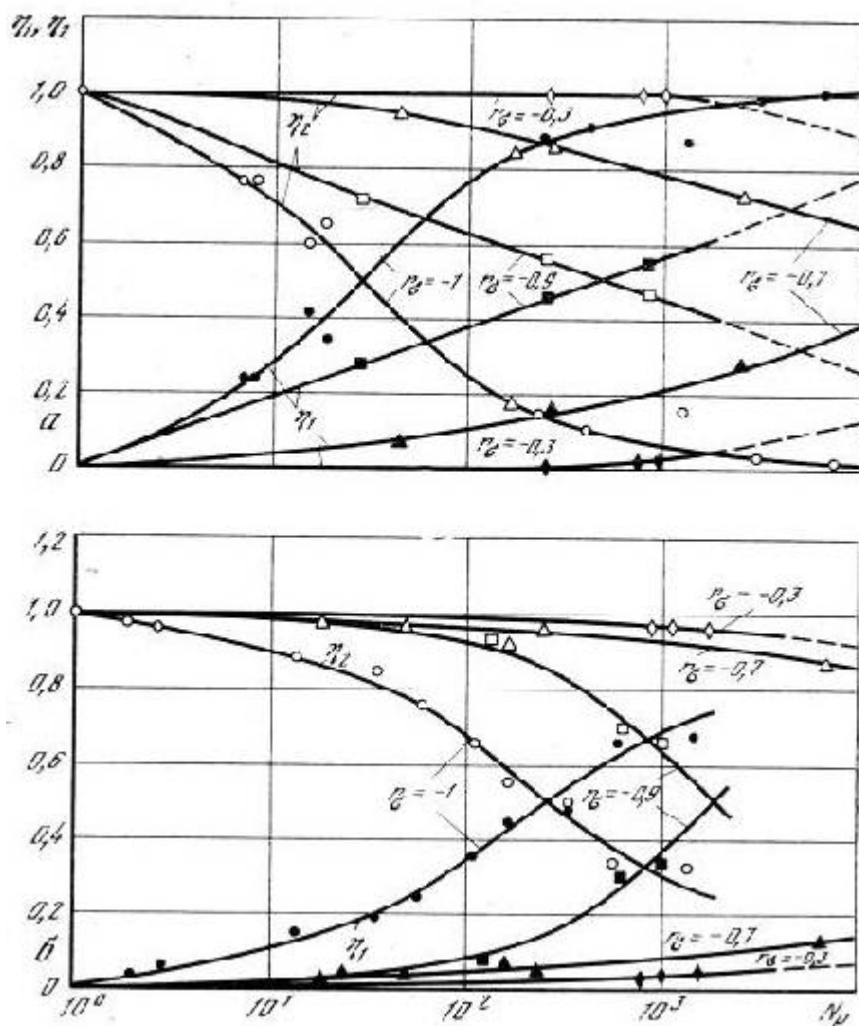


Рис.5. Зависимость накопленного к моменту разрушения усталостного η_1 и квазистатического η_2 повреждений для сталей 22к (а) и ТС (б) от долговечности при различных степенях асимметрии цикла.

В связи с этим в методическом отношении исследовать эффекты усталостного повреждения или особенности кинетики деформаций (например, полей деформаций в зоне надреза) при пульсирующем цикле и больших асимметриях нецелесообразно, особенно если испытанию подвергаются конструкционные материалы в состоянии поставки, когда дисперсия результатов заведомо перекрывает указанные эффекты. В этих случаях, как и при статическом нагружении, разрушение практически происходит от накопленной деформации и установление циклического эффекта оказывается затруднительным.

Изменение условий нагружения (ступенчатое, переход с мягкого режима на жесткий, испытание с выдержками в условиях ползучести, двухчастотное нагружение и пр.) вызывает изменение сопротивления деформированию материала, а следовательно, влияет на темп накопления повреждений и в конечном случае и на долговечность образца.

Для проверки справедливости критериев (1) и (3) при сложных программах нагружения были проведены испытания при ступенчатом изменении нагрузки (с переходом от низкого уровня нагрузки или деформации к более высокому и наоборот, а также с переходом от мягкого режима к жесткому и наоборот) на различных стадиях повреждения образца.

Если зависимости (1) и (3) справедливы и для сложного нагружения, то при ступенчатом жестком нагружении предельно накопленное повреждение будет описываться выражением

$$\sum_0^p \int_0^{N_i} \frac{\delta_i^2}{\varepsilon^2} dN = 1, \quad (7)$$

а при ступенчатом мягком нагружении –

$$\sum_0^p \left[\int_0^{N_i} \frac{\delta_i^2}{\varepsilon^2} dN + \int_0^{N_i} \frac{\Delta \varepsilon_i}{\varepsilon^2} dN \right] = 1, \quad (8)$$

где p – число ступеней нагружения; δ_i и δ'_i – ширина петли соответственно в полцикле растяжения и в полцикле сжатия на i -й ступени; N_i – число циклов нагружения на i -й ступени.

Если нагружение ступенчатое при мягком и жестком режимах, то независимо от последовательности действия ступеней предельно накопленное повреждение можно представить в виде

$$\sum_0^p \int_0^{N_i} \frac{\delta_i^2}{\varepsilon^2} dN + \sum_0^q \left[\int_0^{N_j} \frac{\delta_j^2}{\varepsilon^2} dN + \int_0^{N_j} \frac{\Delta \varepsilon_i}{\varepsilon^2} dN \right] = 1, \quad (9)$$

где p – число ступеней жесткого нагружения; q – число ступеней мягкого нагружения; δ_i и δ_j – ширина петли в i -м и j -м циклах жесткого и мягкого нагружения соответственно.

Зависимости (8) и (9) проверяли на образцах из стали 45, изготовленных из прутка диаметром 50 мм и обеспечивающих незначительный разброс экспериментальных данных. Испытания осуществляли при растяжении-сжатии с частотой около 1 цикл/мин. Нагружение производили ступенчато с переходом от жесткого режима к мягкому и наоборот. Причем переход от одного режима к другому характеризовался как увеличением уровня нагрузки (деформации) в ступени, так и ее уменьшением.

Испытания показали, что долговечность материала при переходе с одной ступени на другую определяется уровнем нагрузки (деформации) и степенью поврежденности материала на предшествующей ступени. Последнее обуславливает ширину петли на новой ступени. В тех случаях, когда на предшествующей ступени материал был поврежден существенно (накопленное повреждение более 0,5), на новой ступени ширина петли оказывалась большей, чем при одноступенчатом испытании на том же уровне нагрузки. В

этом случае суммирование повреждений по числу циклов $\sum_0^p n_i / N_{pi}$ дает значения меньше

единицы. Реально это наблюдается, когда на предшествующей ступени число циклов нагружения близко к разрушающему, особенно при испытаниях упрочняющегося или стабилизирующегося материала. Для разупрочняющегося материала накопленное повреждение на первой ступени увеличивает ширину петли на последующих ступенях по сравнению с одноступенчатым нагружением на том же уровне напряжения.

Если переход от одной ступени жесткого нагружения к другой осуществляется с увеличением действующей деформации, то суммирование по n_i / N_{pi} практически дает такой же результат, как и подсчитанный по уравнению (7), т.е. в обоих случаях имеет единицу (предполагается, что при жестком нагружении перераспределение упругих и пластических деформаций незначительно и им можно пренебречь, как это имеет место для большинства конструкционных материалов). Переход на ступень с меньшим размахом упругопластической деформации в условиях жесткого нагружения, как правило, дает

$\sum_0^p n_i / N_{pi} > 1$ (за исключением случая, описанного выше, когда переход осуществляется в

сильно поврежденном на предыдущей ступени материале, при этом обычно уже имеется трещина). Указанное обстоятельство объясняется тем, что большая предварительная деформация упрочняет (наклепывает) материал и при переходе на меньшую амплитуду

упругопластической деформации упругая составляющая оказывается больше, чем при одноступенчатом испытании при этом же размахе. В последнем случае $\sum_0^p n_i / N_{pi} > 1$.

Суммирование же по уравнению (7) всегда дает единицу независимо от характера перехода, так как оно учитывает кинетику петли при переходе с одной ступени на другую.

Особенно заметное отличие от единицы суммирования в виде $\sum_0^p n_i / N_{pi}$ можно получить при переходе с жесткого нагружения на мягкое. Предварительное нагружение с заданным размахом упругопластической деформации вызывает упрочнение материала, и дальнейшее нагружение с заданной амплитудой нагрузки отличается меньшей шириной петли и меньшей интенсивностью накопления деформации, чем при испытании до разрушения на уровне мягкого нагружения.

При нагружении стали 45 в течение 10 циклов жесткого нагружения ($\sum_0^N n / N_p = 0,182$), 50 циклов жесткого нагружения с меньшим размахом

упругопластической деформации ($\sum_0^N n / N_p = 0,167$) и 614 циклов мягкого нагружения, если нагрузка равна нагрузке в последнем цикле предыдущей ступени, значения повреждения, вычисленные по уравнению (9) и по $\sum_0^N n_i / N_{pi}$ для двух первых случаев, составили 0,96 и 2,27. С учетом накопленной деформации на последней ступени мягкого нагружения повреждение, вычисленное по формуле (при $a = b = 1$)

$$\sum \left(\frac{n_i}{N_i} \right) + \sum \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{ист}} \right) = 1 \quad (10)$$

$$\sum \left(\frac{n_i}{N_i} \right)^a + \sum \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{ист}} \right)^b = 1, \quad (11)$$

равно 2,5 (рис.6, кривая 1). Две ступени жесткого нагружения упрочнили материал, поэтому на ступени мягкого нагружения он имел меньшую ширину петли, чем при одноступенчатом нагружении при усилии, соответствующем последней ступени. В этом случае суммирование в виде $\sum_0^p n_i / N_{pi}$ дает повреждение, равное примерно двум, только на ступени мягкого нагружения.

При двухступенчатом нагружении – 200 циклов жесткого ($\sum n / N_p = 0,9$) и 135 циклов мягкого ($\sum n / N_p = 0,6$) – суммирование по зависимости (9) дает значение 1,16 (рис.6, кривая 2), а по уравнению (10) – 1,5.

При мягком нагружении на стадии окончательного разрушения (стадия развития магистральной трещины при жестком режиме, когда $\sum n / N_p = 0,99$) повреждение, подсчитанное по зависимостям (9) и (10), составило соответственно 1,135 и 1,27 (рис.6, кривая 3).

В тех случаях, когда $\sum n / N_p = 0,3$, а затем продолжается до разрушения, в жестком режиме при суммировании по уравнениям (9) и (10), значения повреждений соответственно равны 1,007 и 1,137 (рис.6, кривая 4).

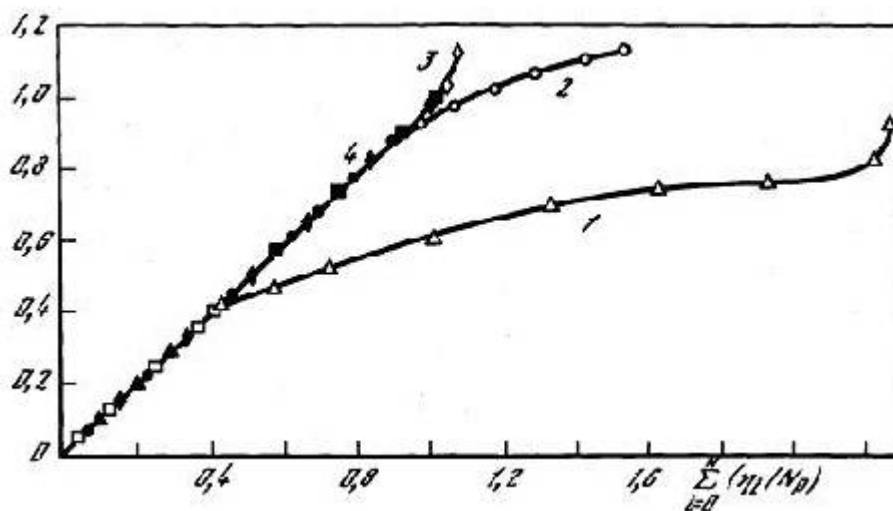


Рис.6. Суммирование повреждений для стали 45 при изменении уровня нагрузки и вида нагружения (светлые точки – мягкое нагружение, темные – жесткое нагружение).

Следовательно, при ступенчатом нагружении суммирование по деформационным характеристикам в соответствии с зависимостями (7) – (9) всегда дает значения, близкие к единице.

Суммирование по уравнениям типа (10), не учитывающим изменение деформационных характеристик от предыстории нагружения, может сильно отличаться от единицы, в зависимости от предварительно накопленного повреждения и типа материала (упрочняющий, разупрочняющий или стабилизирующий). Влияние того или иного вида нагружения на дальнейшее накопление повреждения зависит также и от того, на какой стадии нагружения происходит смена ступеней и в какой последовательности. Для большинства материалов переход от ступени с меньшим ресурсом (по долговечности) в условиях монотонного нагружения к более низкой ступени (по деформации или нагрузке) дает значительное отличие повреждения от единицы при суммировании по циклам n_i/N_{pi} , не учитывающим кинетику петли гистерезиса и односторонне накопленной деформации. Последнее обстоятельство требует также корректировки закона линейного суммирования повреждений по числу циклов и накопленной деформации в ступенях нагружения посредством введения постоянных a и b , как это отражено в зависимости (11).

Таким образом, исследование накопления повреждения при программном нагружении свидетельствует о том, что условия проведения испытаний влияют на сопротивление деформированию, которое определяет разрушение согласно формуле (9). Следует ожидать, что и при более сложных программах нагружения (с эффектом ползучести в цикле в условиях высоких температур, двухчастотное нагружение, а также нагружение с выдержками под нагрузкой в цикле) долговечность в соответствии с критерием (9) будет зависеть от того, каким образом эти условия изменяют сопротивление деформированию материала.

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. Критерии усталостного разрушения. Инженерный журнал «Справочник. Приложение», М., 2007, №6, 35 с.
8. Романов А.Н. Разрушение при малоцикловом нагружении. М., Наука. 1988, 280 с.