УДК 621.539.43.001.24

ПРОБЛЕМЫ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ В МЕХАНИКЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ НА СТАДИИ ОБРАЗОВАНИЯ ТРЕЩИН

Часть 5. Энергия статического и циклического разрушения конструкционных металлических материалов

© Александр Никитович Романов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук
alrom37@mail.ru

Исследуется баланс энергии, затрачиваемой на разрушение при статическом и циклическом нагружении. Предлагается метод определения разрушающей доли в циклах и общем балансе энергии. На основе уникального эксперимента определена доля энергии, рассеивающейся в виде тепла.

Энергетические представления о развитии деформаций и разрушения при циклическом нагружении дают более общие представления этих процессов по сравнению по сравнению с силовыми и деформационныими подходами.

1. Баланс энергии статического и циклического разрушения.

Экспериментальное определение энергии разрушения, определяемое по петлям гистерезиса показало, что энергия разрушения, подсчитанная по площадям петель, во много раз превышает энергию статического разрушения (рис. 1.1). Причем, чем больше долговечность, тем больше величина поглощенной и рассеянной энергии при циклическом нагружении. Кинетика рассеивания и поглощения энергии определяется кинетикой протекания деформационных процессов. Как было показано ранее [1-4], при мягком нагружении (нагружение с заданной амплитудой нагрузки в цикле) для разупрочняющихся материалов ширина петли и её площадь с ростом числа циклов увеличиваются, при жестком нагружении (рагружение с заданным размахом упругопластической деформации в цикле) ширина петли и площадь петли гистерезиса изменяется незначительно.

Анализ существующих подходов к описанию процесса циклического разрушения с точки зрения энергетического представления о развитии деформации показывает, что в ряде случаев за критерий разрушения может быть принята суммарная поглощенная образцом энергия или энергия деформационного упрочнения. Однако суммарная энергия в том и другом случаях оказывается функцией числа циклов нагружения и асимметрии цикла (рис. 1).

Подсчет энергии деформационного упрочнения по петлям гистерезиса как сумма площадей ABCA и EFG (рис.1.2) , полученным при мягком нагружении стали 22к в упругопластической области, показал, что и эта величина во много раз превосходит величину энергии статического разрушения (рис.1.3).

Общая, затрачиваемая на деформирование и разрушения энергия, в своем балансе включает в себя энергию деформирования (изменение размеров и формы), повреждения (разрушения) и рассеиваемую в виде тепла.

Стремлением исследователей всегда было определить долю повреждающей энергии и показать, что величины повреждающих энергий при циклическом и статическом нагружениях равны.

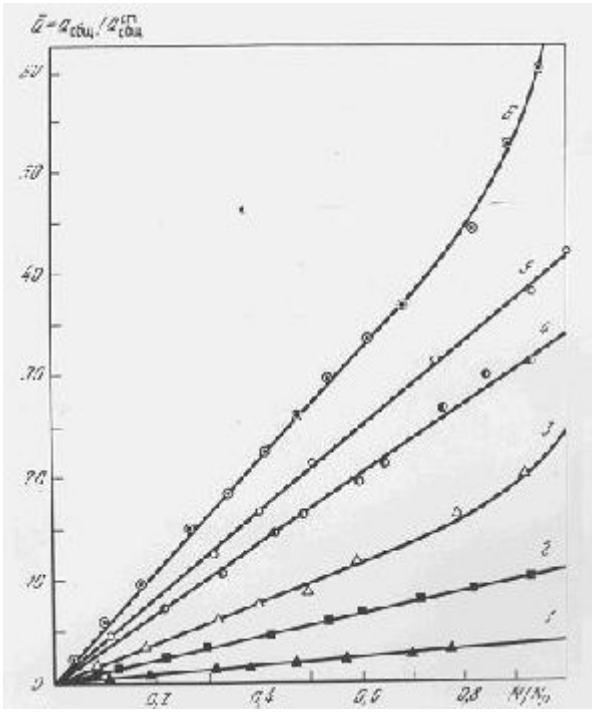


Рис. 1.1.. Зависимость относительной величины общей поглощенной энергии циклического разрушения от долговечности и асимметрии цикла нагружения: 1 – N_p = 256 циклов; r_σ = - 0,3; 2 - N_p = 983, r_σ = - 0,3; 3 - N_p = 253, r_σ = 0.9; 4 - N_p = 1853, r_σ = - 0.7; 5 - N_p = 322, r_σ = - 1; 6 - N_p = 1472, r_σ = - 1.

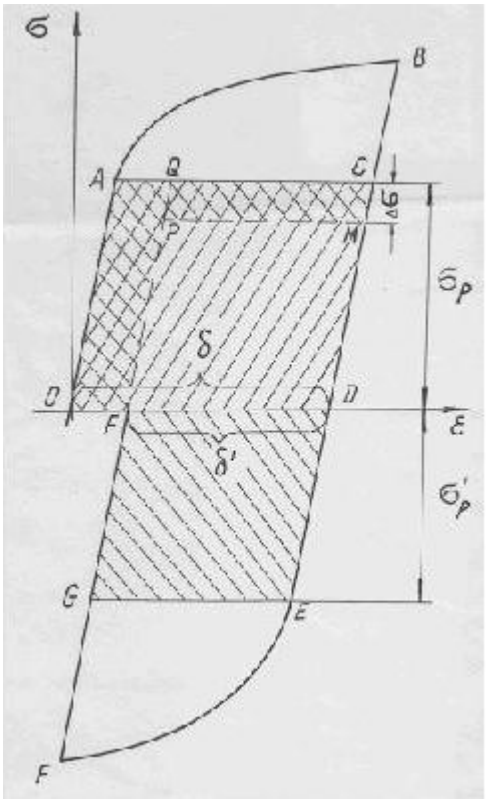


Рис.1 2. Баланс энергий по петле гистерезиса цикла при упругопластическом циклическом деформировании.

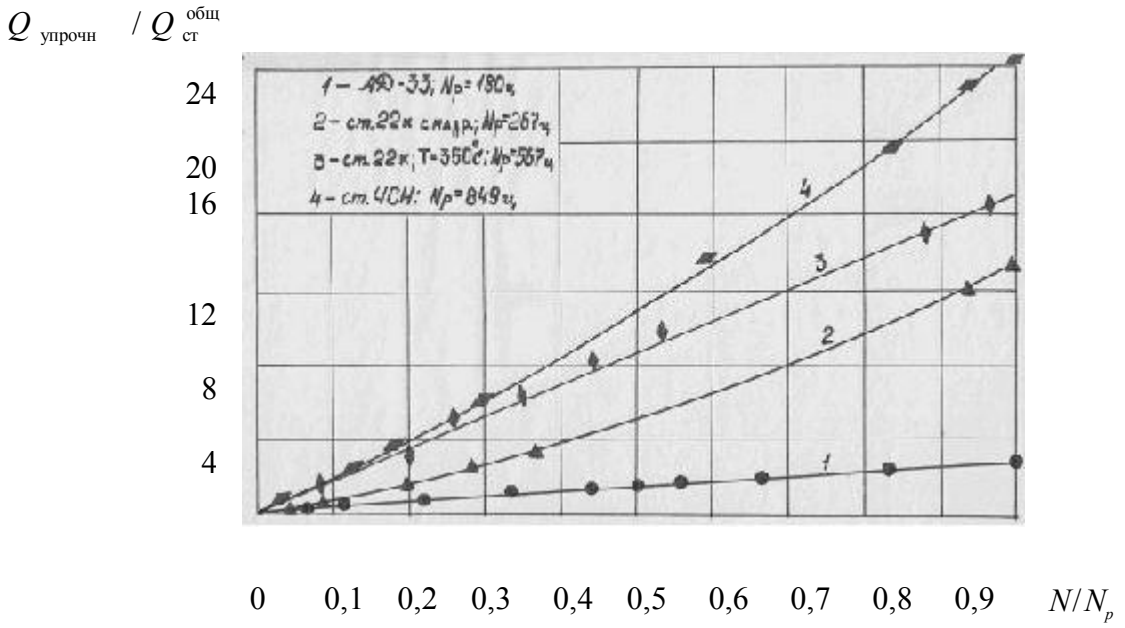


Рис.1.3. Кривые энергии деформационного упрочнения: 1- АД-33, N_p = 180 циклов; 2 – сталь 22 к (с надрезом), N_p = 267 ; 3 – сталь 22к, N_p = 567, Т = 350^{0}С; 4 – сталь ЧСН, N_p = 849 циклов.

В общем случае можно считать, что подведенная к образцу энергия может быть представлена в виде суммы двух слагаемых энергий – обратимой и необратимой поглощенной:

$$Q = Q_1 + Q_2 . \qquad (1.1)$$

Причем обратимая энергия Q_1 представляет собой энергию упругих деформаций, определяемую при разгрузке образца, и энергию, затрачиваемую на обращение пластической деформации при смене знака нагрузки:

$$Q_1 = Q + Q_{пл} . \qquad (1.2)$$

Если предположить, что при изменении знака нагрузки вся энергия (такое предположение может дать погрешность в определении разрушающего числа циклов не более 10%, поскольку повреждение от сжимающей нагрузки на порядок меньше, чем от растягивающей) идет на обращение пластической деформации, то энергия, связанная с разрушением

$$Q = \int_0^{N_p} (q_1 - q_2) dN , \qquad (1.3)$$

Где q_1 и q_2 – площади петли гистерезиса соответственно в полуциклах растяжения и сжатия; N_p – разрушающее число циклов.

Если принять, что разрушение происходит при достижении

$$Q = Q_{ст}^{\Sigma} , \qquad (1.4)$$

где $Q_{ст}^{\Sigma}$ определяется площадью под кривой статического растяжения, то условие разрушения может быть записано в виде

$$\int_0^{N_p}(q_1 - q_2)dN = Q_{\text{ст}}^{\Sigma} . \qquad (1.5)$$

где $Q_{\text{ст}}^{\Sigma}$ определяется площадью под кривой статического растяжения, то условие разрушения может быть записано в виде

$$\int_0^{N_p}(q_1 - q_2)dN = Q_{\text{ст}}^{\Sigma} . \qquad (1.5)$$

Обработка экспериментальных данных большого числа конструкционных материалов (стали 22к, ТС, Х18Н10Т, сталь 45, алюминиевый сплав АД-33, сталь 16ГНМ и др.) в соответствии с уравнением (1.3) в виде

$$Q = \sum_0^{N_p}(q_1 - q_2) \qquad (1.6)$$

показывает (рис.1.4), что условие (5) выполняется лишь при квазистатическом разрушении материалов, когда односторонне накопленная пластическая деформация циклического нагружения практически равна деформации однократного статического разрушения (кривые 1, 5, 6, 9 на рис.1.4). При больших долговечностях (усталостный и смешанный типы разрушения) подсчитанная по зависимости (6) энергия превышает в несколько раз (кривые 2, 3, 4, 7 и 8 на рис. 1.4) энергию однократного разрушения, хотя это отличие приблизительно на порядок меньше, чем при простом суммировании полных площадей петель гистерезиса.

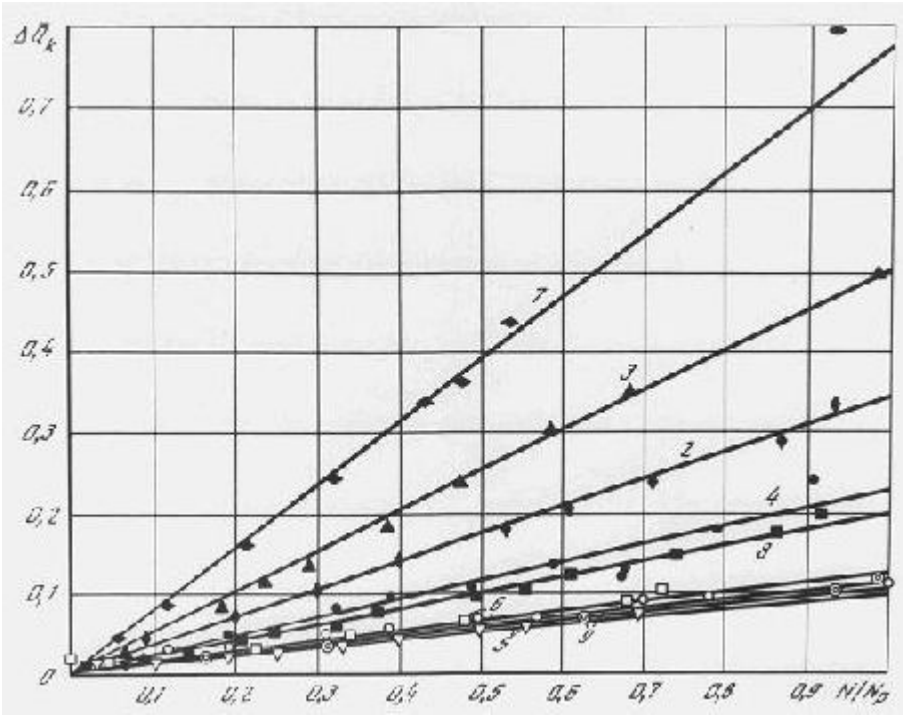


Рис.1.4. Зависимость суммарной поглощенной энергии с учетом обратимости пластической деформации от разрушающего числа циклов и коэффициента асимметрии цикла для стали 22к при мягком нагружении: 1,2 - = - 0,3; 3 -5 - = - 0,9; 6 – 8 - = 0.7; 9 - = -1.

Это обстоятельство показывает, что и при суммировании по зависимости (1.6), учитывающей обратимость пластической деформации, хотя и в меньшей степени, чем при суммировании полных площадей петель, продолжают суммироваться энергии, не участвующие непосредственно в разрушении, и при больших долговечностях могут дать значительную погрешность (в несколько раз) в случае принятия условия (1.5) в качестве предельного.

Если учесть, что

$$q_1 = \int_0^{\delta} (\sigma_p + \sigma^*) d\delta \,, \tag{1.7}$$

$$q_2 = \int_0^{\delta'} (\sigma_p + \sigma^{**}) d\delta \,, \tag{1.8}$$

где $\sigma^* = \sigma - \sigma_p$; $\sigma^{**} = \sigma' - \sigma'_p$, (1.9)

то зависимость (1.5) может быть представлена в виде (начало координат – в начале полуцикла нагружения)

$$\int_0^{N_p} \left[\left(\sigma_p \delta + \int_0^{\delta} \sigma^* d\delta \right) - \left(\sigma'_p \delta' + \int_0^{\delta'} \sigma^{**} d\delta \right) \right] dN = Q_{\text{ст}}^{\Sigma} \tag{1.10}$$

или

$$\int_0^{N_p} \left[\left(\sigma_p \delta - \sigma'_p \delta' \right) + \left(\int_0^{\delta} \sigma^* d\delta - \int_0^{\delta'} \sigma^{**} d\delta \right) \right] dN = Q_{\text{ст}}^{\Sigma} \,, \tag{1.11}$$

причем

$$Q_{\text{ст}}^{\Sigma} = \sigma_p^{\text{ст}} \varepsilon + \int_0^{\varepsilon} (\sigma - \sigma_p^{\text{ст}}) d\varepsilon \,, \tag{1.12}$$

где $\sigma_p^{\text{ст}}$ - 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.

Величина $\left(\sigma_p \delta - \sigma'_p \delta' \right)$ в уравнении (1.11) представляет собой разность энергий пластического формоизменения в полуциклах растяжения и сжатия, а величина $\left(\int_0^{\delta} \sigma^* d\delta - \int_0^{\delta'} \sigma^{**} d\delta \right)$ есть разность энергий деформационного упрочнения в полуциклах растяжения и сжатия. При статическом растяжении энергия пластического формоизменения определяется как $\sigma_p^{\text{ст}} \varepsilon$, а энергия деформационного упрочнения – как $\int_0^{\varepsilon} (\sigma - \sigma_p^{\text{ст}}) d\varepsilon$.

Как показывает эксперимент, суммирование энергий деформационного упрочнения по полуциклам нагружения дает большую величину по сравнению с энергией деформационного упрочнения при статическом разрушении. В тех случаях, когда удается описать зависимость суммарной энергии циклического деформационного упрочнения от

соответствующей энергии статического разрушения, эта зависимость оказывается сложной вследствие специфических особенностей процесса многократного упрочнения при знакопеременной нагрузке. Более того, в ряде случаев (например, при симметричном цикле нагрузки) сумма разностей энергий деформационного упрочнения между полуциклами растяжения и сжатия оказывается больше энергии статического растяжения, т.е.

$$\sum_{0}^{N_p}\left(\int_{0}^{\delta}\sigma * d\delta - \int_{0}^{\delta'}\sigma ** d\delta - \right) > Q_{\text{ст}}^{\Sigma}. \qquad (1.13)$$

В связи с этим, а также основываясь на зависимостях (1.1) – (1.4), исключим из рассмотрения как при циклическом, так и при статическом нагружениях энергию деформационного упрочнения и будем осуществлять суммирование энергий пластического деформирования (как если бы материал был идеально пластичным) с учетом обратимости пластической деформации. Другими словами, считаем, что всякий материал обладает некоторым запасом пластичности, реализация которой зависит от условий нагружения и структурного состояния материала.

Тогда на основе изложенного выше условие разрушения может быть записано в виде

$$\int_{0}^{N_p}(\sigma_p\delta - \sigma'_p\delta)dN = Q_{\text{ст}}, \qquad (1.14)$$

$$Q_{\text{ст}} = \sigma_p^{\text{ст}}\varepsilon. \qquad (1.15)$$

Тогда

$$\int_{0}^{N_p}(\sigma_p\delta - \sigma'_p\delta)dN = \sigma_p^{\text{ст}}\varepsilon. \qquad (1.14')$$

Для жесткого нагружения (с заданным размахом упругопластической деформации) кинетика петли практически не имеет места и можно принять $\delta = \delta' = const$. Тогда зависимость (1.14) с учетом зависимости (1.15) может быть представлена в виде

$$\int_{0}^{N_p}\delta(\sigma_p - \sigma'_p)dN = \sigma_p^{\text{ст}}\varepsilon. \qquad (1.16)$$

В зависимости (17) разность циклических пределов пропорциональности $(\sigma_p - \sigma'_p)$ представляет собой циклический (в отличие от статического, определяемого в первом цикле) эффект Баушингера [7] 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 (1.17) при одноосном растяжении совпадает с теоретическим критерием В.В.Новожилова-А.Г.Рыбакиной (1.1):

$$\int KPdL = 1,$$

(где P – интенсивность микронапряжений, L – длина пути пластического деформирования); если принять для одноосного растяжения

$$P = (\sigma_p - \sigma'_p), \qquad L = \int_{0}^{N_p}\delta dN \qquad \text{и} \quad K = \frac{1}{\sigma_p^{\text{ст}}\varepsilon}.$$

Проверка критерия (1.14) 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_σ=-1; -0,9; -0,7; -0,3; жесткое нагружение, температура испытания до 450^0С, образцы сплошные цилиндрические, трубчатые, без концентратора напряжений и плоские с концентратором напряжений), теплоустойчивая сталь ТС (мягкое и жесткое нагружение, r_σ=-1; -0,9; -0,7; -0,3 и 0; температура испытаний до 550^0С, образцы сплошные и трубчатые, также плоские с концентратором напряжений), алюминиевый сплав АД-33 (мягкое и жесткое нагружение, образцы сплошные и трубчатые, r_σ=-1; 0 и +0,5), сталь 45 (мягкое и жесткое нагружение корсетных образцов, r_σ=-1), сталь 16ГНМА электрошлакового переплава (сплошные цилиндрические образцы, r_σ=-1), сталь ЧСН (сплошные образцы, r_σ=-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

$$Q = \sum_{0}^{N_p} (\sigma_p \delta - \sigma'_p \delta'). \qquad (1.18)$$

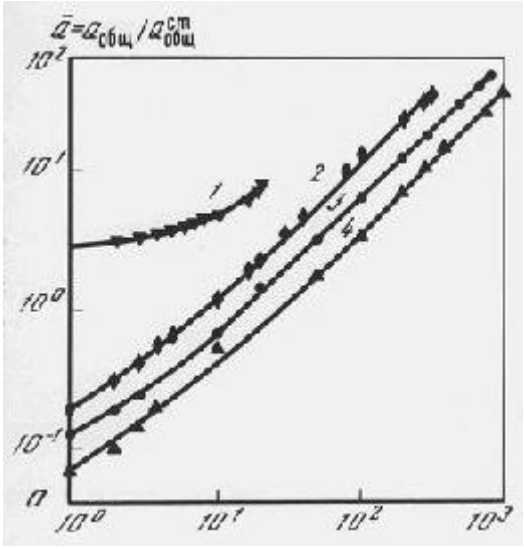
В качестве примера на рис.1.5 приведены результаты обработки стали 22к, испытанной при симметричном цикле в условиях комнатной температуры [65].

Как видно из рис. 5,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 (1.18) показала независимость предельно накопленной энергии от разрушающего числа циклов (рис. 1.5,б). Причем предельная величина накопленной энергии равна величине энергии статического разрушения, определяемого как $Q_{\text{ст}} = \sigma_p^{\text{ст}} \varepsilon$.

Результаты обработки экспериментальных данных (рис.6) показали их хорошее соответствие с критерием (1.14). Лишь для отдельных образцов наблюдалось отклонение до 50% от среднего значения, что находится в соответствии с разбросом экспериментальных данных (по долговечности) для конструкционных материалов в состоянии поставки.

На рис 1.6 представлены результаты обработки по зависимости (1.14[1,]) следующие стали:

1 – сталь 22к, 2 – сталь ТС, 3 – сталь 45, 4 – сталь ЧСН, 5 – сталь 16гнма, 6 – АД -33.



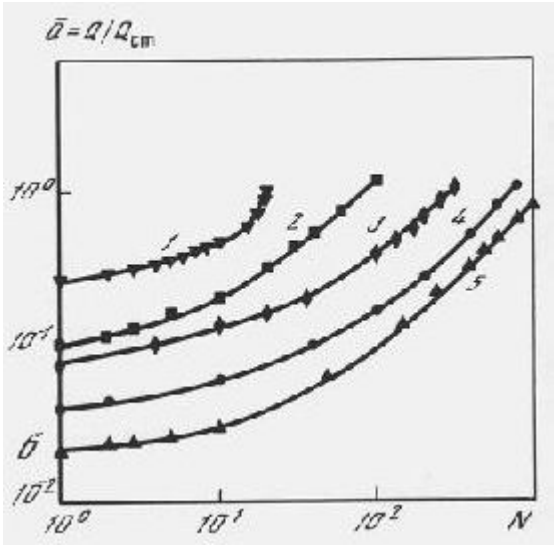


Рис. 1.5. Зависимость суммарной поглощенной энергии(а) и суммарной энергии формоизменения с учетом обратимости пластической деформации (б) от числа циклов нагружения для стали 22к при симметричном цикле нагрузки.

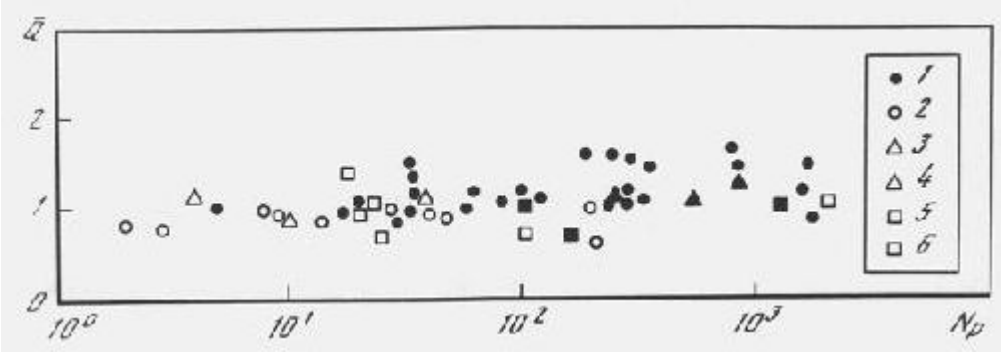


Рис.1.6. Зависимость величины предельно поглощенной энергии циклического разрушения, определяемой по зависимости (4.18), от разрушающего числа циклов.

2. Методика экспериментального определения тепловой энергии при статическом и циклическом разрушении.

Процесс деформирования материала сопровождается затратой определенного количества механической энергии, подводимой к деформируемому телу тем или иным способом. Изучение этого процесса, приводящего в конечном счете к разрушению материала, для различных условий нагружения (статическое и циклическое) связано с разработкой соответствующих энергетических критериев, в основу которых может быть положен баланс между затраченной, выделившейся и поглощенной материалом энергии. При этом, как известно, одна часть затраченной на процесс деформирования механической энергии поглощается материалом, вторая часть рассеивается в виде тепла, и уравнение баланса этих составляющих может быть записано в виде

$$A = E + Q, \qquad (2.1)$$

где A – механическая, E – поглощенная материалом и Q – тепловая энергия.

Процесс деформирования материала сопровождается затратой определенного количества механической энергии, подводимой к деформируемому телу тем или иным способом. Изучение этого процесса, приводящего в конечном счете к разрушению материала, для различных условий нагружения (статическое и циклическое) связано с разработкой соответствующих энергетических критериев, в основу которых может быть положен баланс между затраченной, выделившейся и поглощенной материалом энергии. При этом, как известно, одна часть затраченной на процесс деформирования механической энергии поглощается материалом, вторая часть рассеивается в виде тепла, и уравнение баланса этих составляющих может быть записано в виде

$$A = E + Q, \qquad (2.1)$$

где A – механическая, E – поглощенная материалом и Q – тепловая энергия.

Попытка определения входящих в уравнение (2.1) составляющих неоднократно предпринималась в ряде работ, однако полного экспериментального подтверждения полученных аналитическими методами результатов вследствие значительных методических трудностей получено не было.

Методика вычисления и экспериментального определения механической энергии A, затрачиваемой на деформирование материала, не вызывает особых затруднений. Ее величина, определяемая как

$$A = \int_{e_0}^{e_k} P de, \qquad (2.2)$$

(где P – усилие, e_0 и e_k – начальная, конечная длины деформируемого тела соответственно) может быть получена измерением площади под диаграммой деформирования в координатах усилие-абсолютная деформация(P – Δe). Кроме этого, величина A может быть получена измерением подводимой к электродвигателю нагружающей системы установки электрической энергии. Однако первый метод имеет ряд преимуществ перед вторым и при использовании соответствующих средств регистрации позволяет более точно и без промежуточных потерь определить ту долю механической энергии, которая затрачивается непосредственно на деформирование исследуемого объекта.

В случае циклического нагружения механическую энергию в каждом цикле определяет площадь петли пластического гистерезиса, а сумма площадей петель составляет всю работу, затраченную на процесс деформирования за рассматриваемое количество циклов.

Методы регистрации циклических диаграмм достаточно хорошо разработаны и широко известны [5,6]

Определение величины тепловой энергии, выделяющейся в процессе упругопластического деформирования, представляет собой более сложную задачу, чем определение величины механической энергии. Для ее решения предлагались различные способы, включая калориметрические измерения, регистрацию температур разогрева и др. В настоящей работе для определения доли энергии, затрачиваемой на процесс деформирования, которая выделяется в виде тепла, предлагается использовать рассмотренный ранее [7] метод прецизионного измерения температуры саморазогрева деформируемого образца. С этой целью к образцу на различных его участках точечной сваркой привариваются хромель-копелевые термопары, и электрический сигнал от них после усиления регистрируется автоматическими потенциометрами в координатах температура -– усилие, температура – деформация или температура – время (под термином «температура» понимается разность температур исходного и текущего состояний материала образца).

Известно [58, 59], что упругое деформирование материала в условиях растяжения вызывает уменьшение его температуры. Это обстоятельство с позиций термодинамики

может быть отчетливо показано при решении дифференциального уравнения энтальпий *i* при независимых параметрах температуры *T* и давления *p*:

$$di = C_p dT + [V - T(\partial V / \partial T)_p]dp, \quad (2.3)$$

где *T* – абсолютная температура; C_p – удельная теплоемкость материала при постоянном давлении, а *V* – его удельный объем. Если принять, что процесс деформирования наиболее близок к адиабатному, т.е. протекает без подвода или отвода тепла (настоящий эксперимент проводился с теплоизоляцией образца от испытательной системы и в вакууме), то с учетом для этого случая (dq =0) первого закона термодинамики в форме

$$di = Vdp, \quad (2.4)$$

а также

$$(\partial V / \partial T)_p = \beta / \rho \quad (2.5)$$

(где β – температурный коэффициент объемного расширения материала, а ρ – его плотность) при подстановке уравнений (3.3) и (3.4) в уравнение (2.1) будем иметь следующую зависимость изменения температуры при переменном давлении:

$$dT = T\beta dp / \rho C_p$$

или при переходе к конечным разностям

$$\Delta T = T\beta \Delta p / \rho C_p. \quad (2.6)$$

Величина *p* в зависимости (2.6) представляет собой среднее гидростатическое давление, которое для общего случая сложного напряженного состояния определяется через компоненты тензора напряжений в виде $p = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$, а для одноосного нагружения $\Delta p = \Delta\sigma_1 / 3 = \Delta\sigma / 3$. Принимая это во внимание, а также коэффициент температурного линейного расширения $\alpha = 1/3\beta$, из уравнения (2.6) получим зависимость

$$\Delta T = T\alpha \Delta\sigma / \rho C_p, \quad (2.7)$$

которая функционально связывает изменение температуры материала образца при одноосном деформировании в условиях идеального адиабатного процесса. Исходя из термодинамического положения, согласно которому при растяжении $\Delta\sigma < 0$, а при сжатии $\Delta\sigma > 0$, легко установить, что в первом случае в упругой области ΔT имеет отрицательное значение, т.е. температура материала понижается. Зависимость типа (2.7) для случая деформирования твердых тел экспериментально подтверждалась еще Кельвиным. Наши эксперименты, выполненные из стали 12Х2МФА в условиях растяжения в вакууме (с периодической разгрузкой за пределами упругости и последующим после стабилизации температурного состояния нагружением в упругой области после упрочнения) показали достаточно удовлетворительное соответствие расчетному линейному уменьшению температуры с ростом напряжений согласно зависимости (2.7) – рис. 2.1. Однако видно, что экспериментальные точки более упорядоченно расположены в случае расчета по истинным величинам напряжений $\Delta\sigma_{ист}$ (с учетом уменьшения диаметра образца) – рис.2.1,б, чем по условным $\Delta\sigma_{усл}$ – рис.2.1,а, а их некоторое систематическое с ростом $\Delta\sigma_{ист}$ отклонение от расчетной прямой в сторону роста температуры объясняется, по-видимому, неидеальностью процесса.

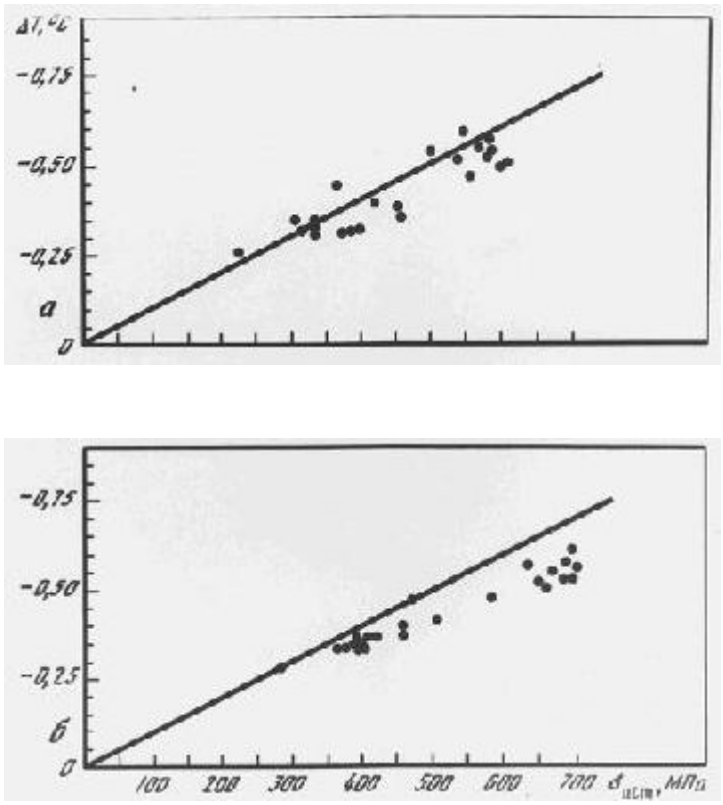


Рис. 2.1. Расчетная зависимость и экспериментальные данные по изменению температуры образца при упругом деформировании по условным (*а*) и истинным (*б*) напряжениям.

При переходе в область упругопластического деформирования как при растяжении, так и при сжатии наблюдается увеличение температуры материала. Для случая статического растяжения диаграмма, регистрируемая в координатах усилие – температура, имеет вид, показанный на рис. 2.2,а. при этом за точкой перегиба после участка уменьшения температуры, соответствующей пределу упругости [7], следует участок ее увеличения, сопутствующий развитию пластической деформации, причем с ростом последней (см. рис2.2,б) температура увеличивается по зависимости, близкой к линейной.

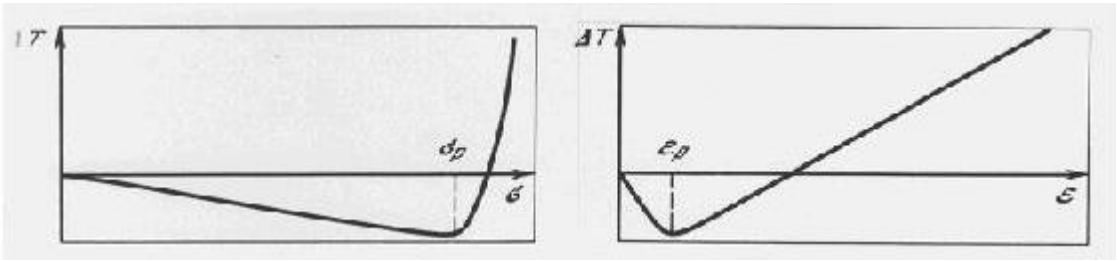


Рис. 2.2. Диаграммы изменения температуры в процессе упругопластического деформирования образца в зависимости от напряжения (*а*) и дформации (*б*).

Для случая циклического упругопластического деформирования, как известно, диаграмма деформирования в координатах усилие – деформация представляет собой петлю пластического гистерезиса (рис. 2.3,в). При регистрации в этом эксперименте диаграммы изменения температуры с изменением прикладываемой нагрузки также имеет место своеобразная температурная петля (рис. 2.3,б), участки уменьшения и роста температуры которой соответствуют периодам нагружения, зарегистрированным на диаграмме деформирования (рис. 2.3,а). В данном случае (пренебрегая отводом тепла в теплоизоляционные захваты установки) имеют место два тепловых процесса. Это, во-первых, линейное по нагрузке уменьшение (при растяжении) или увеличение (при сжатии) температуры вследствие развития упругой составляющей деформации и, во-вторых, увеличение температуры при появлении и развитии пластической деформации. Взаимодействие этих двух процессов и обусловливает характер изменения температуры деформируемого материала в цикле, приведенный на рис. 2.3,б. Это подтверждается и диаграммой изменения температуры, зарегистрированной при циклическом нагружении с остановками на экстремумах растягивающей и сжимающей нагрузки и при разгрузке для стабилизации температурного режима (рис. 2.3,а). Так, участок 1, соответствующий полуциклу растяжения без снятия нагрузки, подобно диаграмме статического растяжения, содержит в себе отрезок линейного уменьшения температуры до достижения предела упругости, переходящий после появления пластической деформации в отрезок интенсивного ее увеличения. После падения температуры до исходного значения (вследствие прекращения процесса деформирования) в процессе упругой разгрузки наблюдается (участок 2) линейное возрастание температуры, описываемое зависимостью (2.7). В последующем после остановки в полуцикле сжатия (участок 3) имеет место вначале линейное, а затем переходящее в существенно прогрессирующее увеличение температуры. И, наконец, разгрузка в полуцикле сжатия вновь сопровождается линейным изменением температуры (участок 4), но уже в сторону ее уменьшения, что также находится в качественном и количественном соответствии с зависимостью (2.7).

Рассмотренную выше методику регистрации тепловых эффектов статического и циклического упругопластического деформирования и предлагается использовать для количественной оценки части энергии, выделяющейся в процессе деформирования в виде тепла. Можно предположить, что выделяющаяся тепловая энергия Q для случая отсутствия теплоизоляции захватов в первую очередь отводится путем теплопроводности Q_m через переходные части и головки образца. Соизмеримой с Q_m является часть энергии Q_p, затрачиваемая на повышение температуры образца (в установившемся состоянии). Тепловая энергия от излучения Q_u, вследствие малых величин температуры разогрева (до десятых долей или единиц градуса), как показали соответствующие вычисления и результаты измерения, оказывается пренебрежимо малой. Конвективный же теплообмен Q_k вследствие проведения эксперимента в условиях вакуума (до 10^{-3} мм рт.ст.) можно считать отсутствующим. Таким образом, общее уравнение баланса выделившейся тепловой энергии может быть записано в виде

$$Q = Q_m + Q_p + Q_u + Q_k, \qquad (2.8)$$

а с учетом, что $Q_u \to 0$ и $Q_k = 0$, имеем

$$Q = Q_m + Q_p. \qquad (2.9)$$

Входящие в уравнение (2.9) составляющие Q_m и Q_p подлежат экспериментальному определению.

Как вытекает из схемы эксперимента, отвод выделившегося в процессе деформирования тепла путем теплообмена осуществляется через головки образца в двух

направлениях, т.е. поток тепла Q_m разбивается на две составляющие Q_m^I и Q_m^{II}. По закону Фурье количество тепла Q, прошедшее через площадку dF за время $d\tau$, составляет

$$Q = -\int_F \int_\tau \lambda \frac{dTdF}{dx} d\tau , \qquad (2.10)$$

Где λ – коэффициент теплопроводности, а dT/dx - градиент температур в направлении теплового потока. Для образца цилиндрической формы с базой, деформируемой в упругопластической области, и переходными частями (площадью F), деформируемыми упруго, градиент температуры на последних может быть определен исходя из измерения разности температур ΔT на участке Δx, и в частности, в точках 4 и 2, отстоящих друг от друга на расстояние 5 мм (рис. 2.4,а). Это оказывается возможным в силу линейности распределения температур ан переходной части образца, что подтверждено экспериментально измерением величины температуры разогрева между точками 1-5 (рис.2.4,а). При этом измерения проводились как в процессе активного деформирования (периоды времени ($\tau_1 - \tau_4$), так и после его прекращения в процессе охлаждения образца ($\tau_5 - \tau_{10}$). Из рис.2.4,а видно, что даже на отрезке, включающем точки 1, 3, 5, имеет место линейное распределение температур как при разогреве (сплошные линии), так и при охлаждении (пунктирные).

Таким образом, измерение разности температур ΔT на участке Δx между точками 2-4, находящимися на отрезке 1-5, позволяет получить значение $\Delta T/\Delta x$, близкое к действительному градиенту температур dT/dx. Принимая, что в силу малости упругих деформаций переходной части образца, величины F и Δx могут считаться постоянными, количество выделившегося в процессе пластического деформирования базы образца тепла и прошедшего при этом за время τ через правую и левую переходные части согласно уравнению (2.10) соответственно составит

$$Q_m^I = -\frac{\lambda F_I}{\Delta x_I} \int_0^\tau \Delta T_I d\tau ,$$

$$Q_m^{II} = -\frac{\lambda F_{II}}{\Delta x_{II}} \int_0^\tau \Delta T_{II} d\tau , \qquad (2.11)$$

а общее количество тепла, отведенного путем теплообмена

$$Q_m = Q_m^I + Q_m^{II} . \qquad (2.12)$$

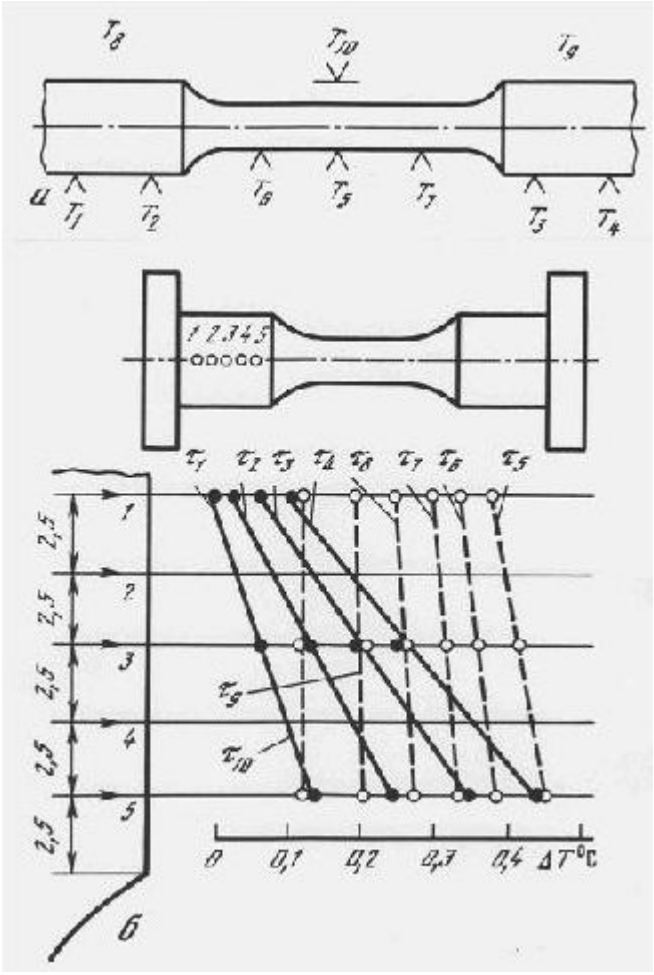


Рис. 2.3. Схема размещения термопар на образце (*а*) и результаты регистрации изменения температуры образца в переходной части при активном нагружении (сплошные линии) и при охлаждении образца после прекращении нагружения (пунктирные линии (*б*)).

Для измерения разности температур в переходных частях образца, а также температуры разогрева его рабочей базы и периферийных областей к образцу приваривались термопары $T_1 - T_{10}$ в точках, показанных на рис. 2.3,б. Термопары T_1 и T_2, а также T_3 и T_4, соединенные по схеме дифференциальной термопары, позволяли регистрировать разности температур ΔT_I и ΔT_{II}, входящие в уравнения (3.19). При этом осуществлялась непрерывная запись во времени разностей ΔT_I и ΔT_{II} на потенциометре типа КСП-4. Последующее планиметрирование площади под кривой от момента исходного нагружения до момента стабилизации теплового режима ($\Delta T_I = \Delta T_{II} = 0$) позволило получать соответствующие численные значения определенных интегралов уравнений (3.19). Температура рабочей зоны образца измерялась с помощью термопар T_5, T_6 и T_7 (рис. 2.4,б), первая из которых расположена в центре, а две другие – на равных расстояниях от галтелей и центральной термопары. Пример регистрации изменения температуры в процессе эксперимента с помощью термопары T_5 и разность температур $T_1 - T_2$ приведены соответственно на рис. 2.4,а,б. Измерения температур в точках 5 – 7 позволяют определить количество тепла Q_p, затраченное на непосредственный разогрев образца (увеличение теплосодержания системы) после прекращения теплоотвода от его базы. В этом случае величина Q_p определяется как

$$Q_p = C_p V \rho \Delta T , \qquad (2.13)$$

где ΔT – разность температуры деформируемого объема до и после процесса нагружения (рис. 2.5,а); C_p – удельная теплоемкость материала, а ρ – его плотность. При этом в процессе эксперимента после стабилизации теплового режима на базе образца (регистрируемое термопарами $T_5 - T_7$) и на его переходных частях (термопары T_8 и T_9) регистрировался отвод тепла (наличие градиента температур). Термопара T_{10}, показанная на рис. 2.3,б, регистрировала температуру разогрева экрана, который находился на некотором расстоянии от образца и служил для определения отводимого посредством излучения количества тепла, оказавшегося пренебрежимо малым.

Как и в случае статического нагружения, при циклическом упругопластическом деформировании имеет место выделение тепловой энергии, величина которой может быть зарегистрирована по описанной выше методике. Однако характер диаграммы изменения градиента температур в переходной части образца при прохождении через нее теплового потока за n циклов имеет иной характер (рис. 2.4,б), чем при статическом нагружении (рис. 2.5,а). В этом случае площадь данной кривой будет характеризовать величину тепла, прошедшего через переходную часть образца за время τ, в течение которого осуществлялся процесс циклического деформирования и проходила стадия стабилизации теплового режима после прекращения нагружения.

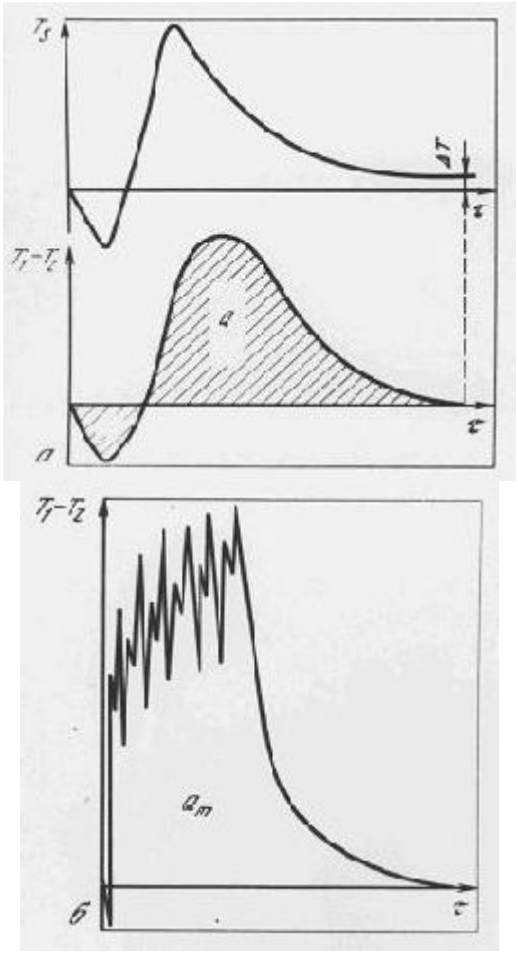


Рис. 2.4. Диаграммы изменения во времени температуры образца(а) и и разности температур в переходной его части при статическом (б) и циклическом (в) нагружении.

Рассмотренная схема проведения эксперимента, обеспечивающая количественное определение всех величин, входящих в уравнения (2.11) – (2.12), позволяет в соответствии с зависимостями (2.8) и (2.9) установить полную величину тепловой энергии, выделяющейся в данном эксперименте при статическом или циклическом упругопластическом деформировании.

Величина энергии E, поглощенной материалом в процессе деформирования, определится как разность входящих в уравнение (2.1) величин затраченной механической энергии A и выделившейся тепловой энергии Q.

Таким образом, изложенная методика определения составляющих баланса энергии деформирования позволяет достаточно корректно получить величину поглощенной и рассеянной в виде тепла энергии для случаев статического и циклического нагружения.

3. Энергия статического и циклического упругопластического деформирования и разрушения конструкционных материалов

Рассмотрение процесса деформирования материала на основе энергетических представлений дает возможность записать уравнение баланса составляющих составляющих затраченной механической энергии в виде [54, 55]:

$A + E = Q_1$

где E – поглощенная материалом энергия, а Q_1 - выделившиеся тепловая энергия.

Для количественного определения составляющих энергии в уравнении (3.22) использовались различные методы, однако в силу ряда причин они не позволяли комплексно подойти к этому вопросу. Предложенный же в работе метод дает возможность с высокой точностью при статическом или циклическом упругопластическом деформировании материала количественно определить механическую энергию, затраченную на процесс деформирования, и тепловую энергию, выделившуюся во время этого процесса, в связи с этим и их разность -- величину энергии, поглощенной материалом.

С использованием этого метода были проведены эксперименты по статическому и циклическому упругопластическому деформированию цилиндрических образцов из стали 12Х2МФА в условиях одноосного растяжения-сжатия. Для этой цели была использована испытательная установка УМЭ-10т [6]. Оснащенная вакуумной камерой [31]. Регистрация диаграмм деформирования осуществлялась с помощью продольного деформометра и динамометра установки, а также с помощью фото-регистрации специальной фото-приставкой контура наружного образца.

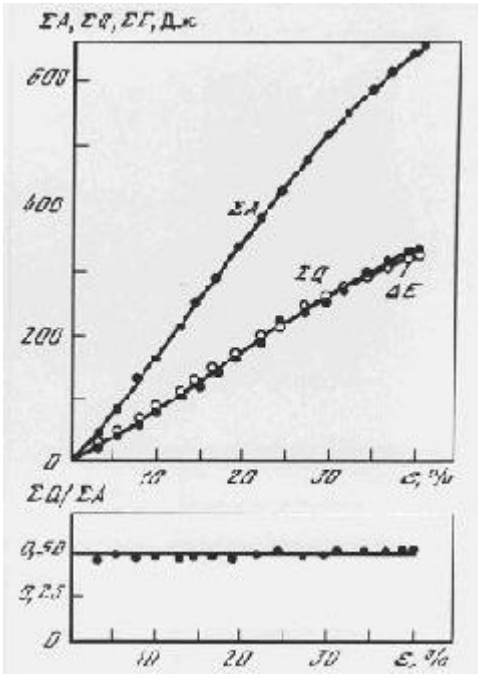


Рис. 3.1. Изменение суммарной механической А, тепловой Q и поглощенной материалом энергии Е в зависимости от степени деформации при статическом нагружении.

Результаты выполненных измерений суммарной затраченной механической энергии, выделившейся тепловой и поглощенной материалом приведены на рис.3.1,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 (рис. 3.1,б) и составляет величину приблизительно 0,5, т.е. имеет место одинаковые значения тепловой и механической энергии.

В условиях циклического нагружения эксперимент осуществлялся в мягком режиме деформирования (с заданной амплитудой нагрузки) образца с амплитудой напряжения 460 МПа (образец разрушился после 137 циклов).

Характер изменения ширины петли гистерезиса представлен на рис. 3.2,*а*. Кривые изменения полной механической энергии, затрачиваемой на процесс циклического деформирования, а также полной тепловой энергии, выделившейся при этом, и полной энергии, поглощенной материалом, представлены на рис. 3.2, *б*.

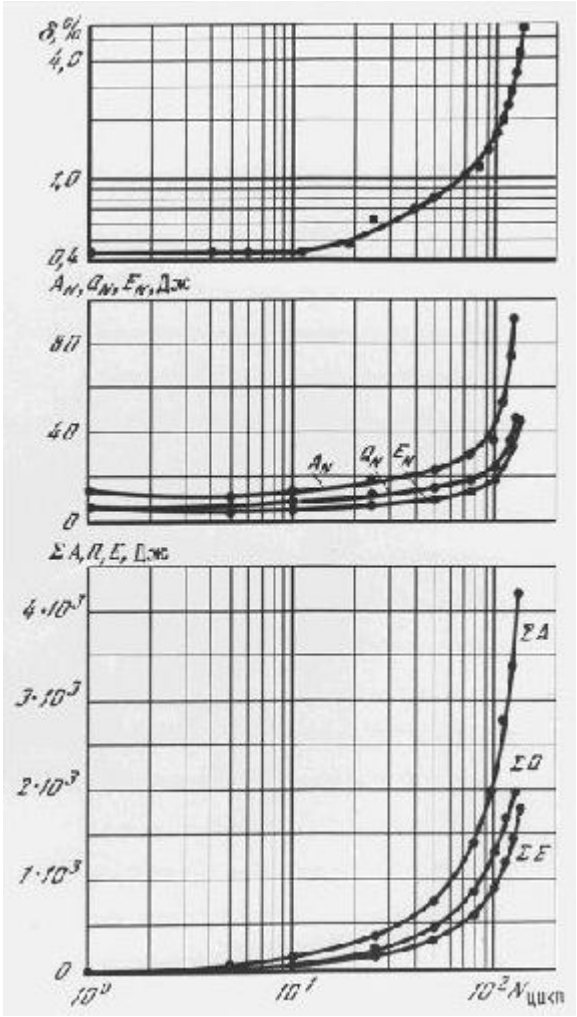


Рис. 3.2.Изменение ширины петли (а), механической энергии A_N, тепловой Q_N и поглощенной E_N и соответственно их суммарных значений в зависимости от числа циклов мягкого нагружения

Как видно из рис. 3.3, *а,* при мягком нагружении разупрочняющегося материала (сталь ТС) количество общей тепловой энергии и поглощенной материалом энергии Е за цикл увеличивается с ростом числа циклов нагружения.

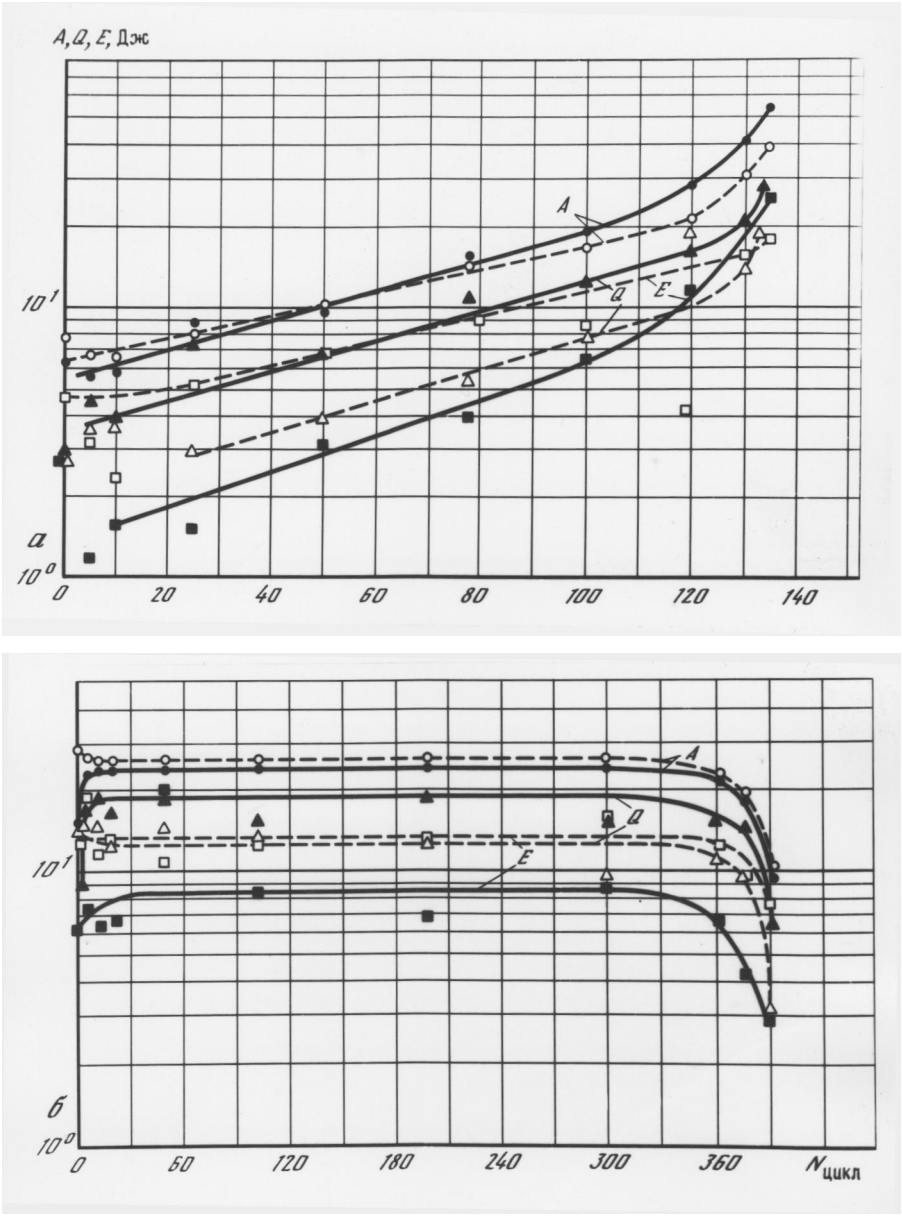


Рис. 3.3. Механическая энергия А (1), тепловая Q (2) и поглощенная материалом Е)3) в полуцикле растяжения (сплошные линии) и полуцикле сжатия (пунктирные линии) для стали ТС: а –жесткое нагружение, б – мягкое нагружение.

При жестком нагружении в процессе всего времени деформирования механическая энергия А в полуциклах растяжения меньше, чем в полуциклах сжатия (рис. 3.3, *б)*. При этом тепловая энергия так же, как и при мягком нагружении (рис. 3.3,*а*) больше в полуцикле растяжения, а поглощаемая материалом энергия Е больше в полуцикле сжатия, чем в полуцикле растяжения.

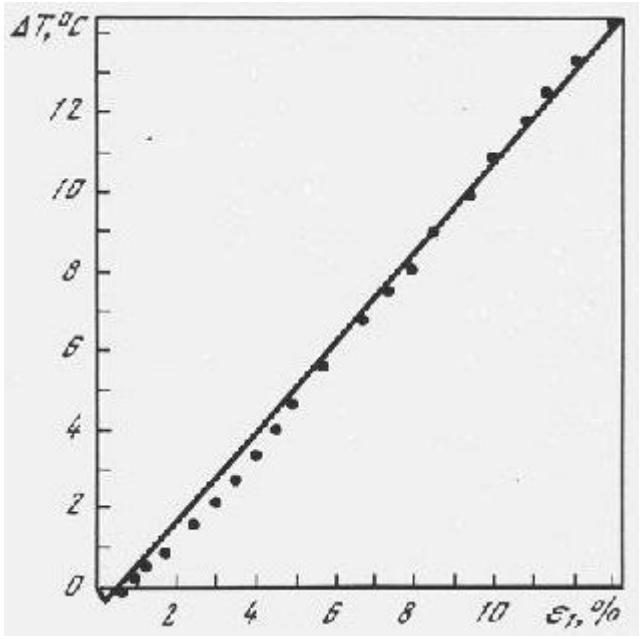


Рис. 3.4. Связь температуры с величиной пластической деформации.

Для определения удельной тепловой энергии в зоне разрушения использовалась полученная ранее аналитическая зависимость связи температуры с деформацией [7]. На рис. 3.4 представлена линейная зависимость приращения температуры от величины деформации.

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.**
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, №, 2014, **с.**
5. Романов А.Н. Критерии усталостного разрушения. Инженерный журнал «Справочник. Приложение», М., 2007, №6, 35 с.

6. Романов А.Н. Разрушение при малоцикловом нагружении. М.:Наука. 1988, 280 с.

7. Романов А.Н. Гаденин М.М. Методы определения циклического эффекта Баушингера. Заводская лаборатория , 1972, Т. 38, №1, с. 99-102.