УДК 621.539.43.001.24

ПРОБЛЕМЫ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ В МЕХАНИКЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ НА СТАДИИ ОБРАЗОВАНИЯ ТРЕЩИН
Часть 14. Связь статических и циклических свойств конструкционных материалов

© Александр Никитович Романов
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Россия, г. Москва
alrom37@mail.ru

Аннотация. *Показано, что циклическое поведение конструкционного материала зависит от его статических свойств и структурного состояния и может быть определено по кривым однократного разрушения. Характер поведения материала предопределяет изменение микротвердости в процессе циклического нагружения. Установлена доля пластичности материала, соответствующая моменту потере устойчивости пластической деформации при статическом разрыве образца и определяющая его несущую способность при циклическом нагружении.*

Ключевые слова*: циклическое нагружение, упругопластическое деформирование, микротвердость, несущая способность материала, предельная пластичность, циклическое нагружение, критерий разрушения.*

MATERIALS SCIENCE PROBLEMS IN MECHANICS OF DEFORMATION AND DESTRUCTION AT A STAGE OF FORMATION OF CRACKS
Part 14. Communication of static and cyclic properties of constructional material.

© Alexander Romanov
IMASH RAN, Moscow, Russia
alrom37@mail.ru

Abstract. *It is shown that the cyclic behavior of constructional material depends on its static properties, its structural state. Nature of behavior of material predetermines change of microhardness in the course of cyclic loading. The share of plasticity of material defining the bearing ability of material is defined.*

Keywords: *cyclic loading, elasto-plastic deformation, the microhardness, bearing ability of material, limit plasticity, cyclic loading, criterion of destruction, plasticity.*

Статические свойства конструкционных материалов определяют характер их поведения при циклическом нагружении: упрочнение, разупрочнение или стабилизация, а тем самым и темп накопления повреждений [1-15].

Для оценки уровней накопления повреждений на заданной стадии малоциклового нагружения может быть использован деформационно-кинетический критерий в виде [6, 7]:

$$\eta = \int_0^N \frac{\delta e_{yn}}{\varepsilon^2} dN + \int_0^N \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon} dN \qquad (1)$$

где δ - ширина петли гистерезиса в полуцикле растяжения, Δε - односторонне накопленная пластическая деформация в полуцикле растяжения, ε - предельная деформация при статическом разрыве образца (соответствует точке S на кривых растяжения, представленных на рис. 1), e_{yn} – упругая деформация в полуцикле растяжения, N - текущее число циклов соответственно.

В предельном случае, когда наступает разрушение (образование трещины), зависимость (1) преобразуется в критерий для нагружения с заданным уровнем (амплитуды) нагрузки в виде:

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

Для нагружения с заданным размахом упругопластической деформации (жесткое нагружение) в виде:

$$\int_0^{N_p} \frac{\delta e_{yn}}{\varepsilon^2} dN = 1, \qquad (3)$$

где N_f - число циклов до разрушения.

Тип материала (упрочняющийся, разупрочняющийся или циклически стабильный) может быть определен по кривым статического разрушения материала (рис. 1).

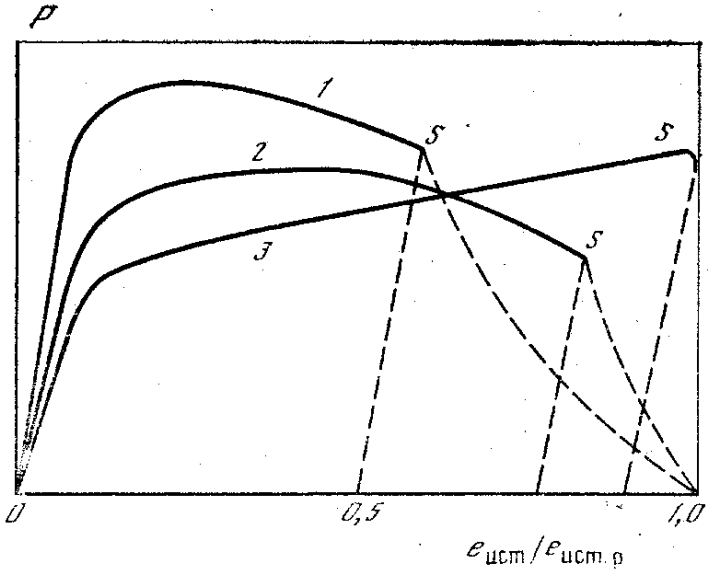


Рис.1. Характер кривых статического растяжения разупрочняющегося (кривая 1), упрочняющегося (кривая 3) и циклически стабильного материала (кривая 2).

Разупрочняющемуся материалу свойственна малая равномерная деформация $\varepsilon_в$ (кривая 1), соответствующая пределу прочности, упрочняющимся материалам - большая равномерная деформация $\varepsilon_в$ (кривая 3), для циклически стабильных материалов $\varepsilon_в = 0{,}5\,\varepsilon$, где ε соответствует деформации, при которой наступает потеря устойчивости пластической деформации (начало образования шейки) при однократном разрушении.

При этом однако следует иметь в виду, что не вся располагаемая материалом пластичность ответственна за обеспечение несущей способности материала элемента конструкции, а лишь та ее часть (ε - в зависимостях (1) – (3), которая реализуется в процессе однократного разрушения образца до потери устойчивости пластической деформации (точка S на рис. 1, соответствующая диаметру d_s на рис. 2,а), когда наступает динамический дорыв образца с образованием шейки (соответствует диаметру d_p на рис.2,б).. В тех случаях, когда отсутствует потеря устойчивости пластической деформации (не происходит «утяжка» материала, по которой судят о пластичности материала, рис. 2,б), за предельную пластичность материала статического разрушения при расчетах по зависимостям (1)-(3) принимают полное ее значение (d_s на рис. 2,б).

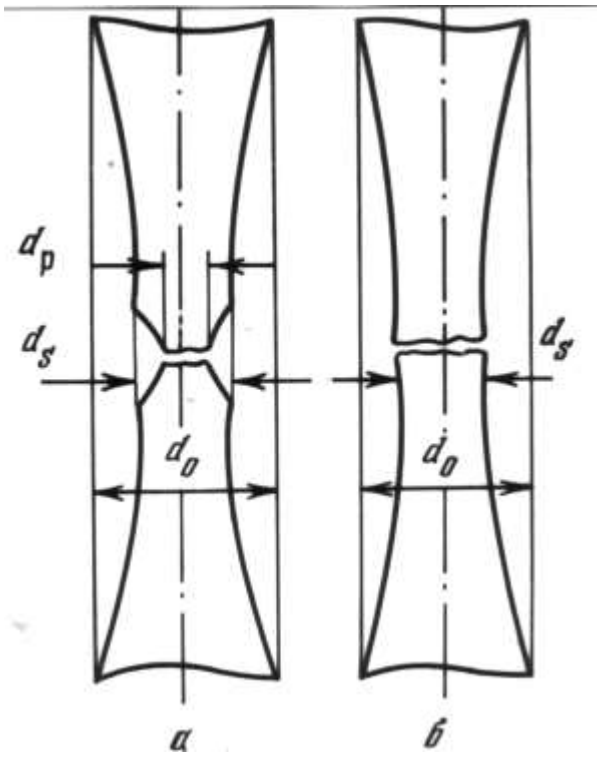


Рис.2. Определение пластичности материала, обеспечивающей несущую способность материала.

Как следует из рис. 3,а, хорошее соответствие эксперименту дает предположение, что несущую способность образца определяет та часть пластичности, которая предшествует потере устойчивости пластической деформации при однократном разрушении образца (точка S на рис.1, диаметр d_s на рис.2,а. Если же принять, что за разрушение ответственна только половина истинной деформации образца, как это предложено в известной зависимости Коффина, то согласование с экспериментом наблюдается лишь для сталей с пластичностью порядка 50% и более (рис. 3,*б*).

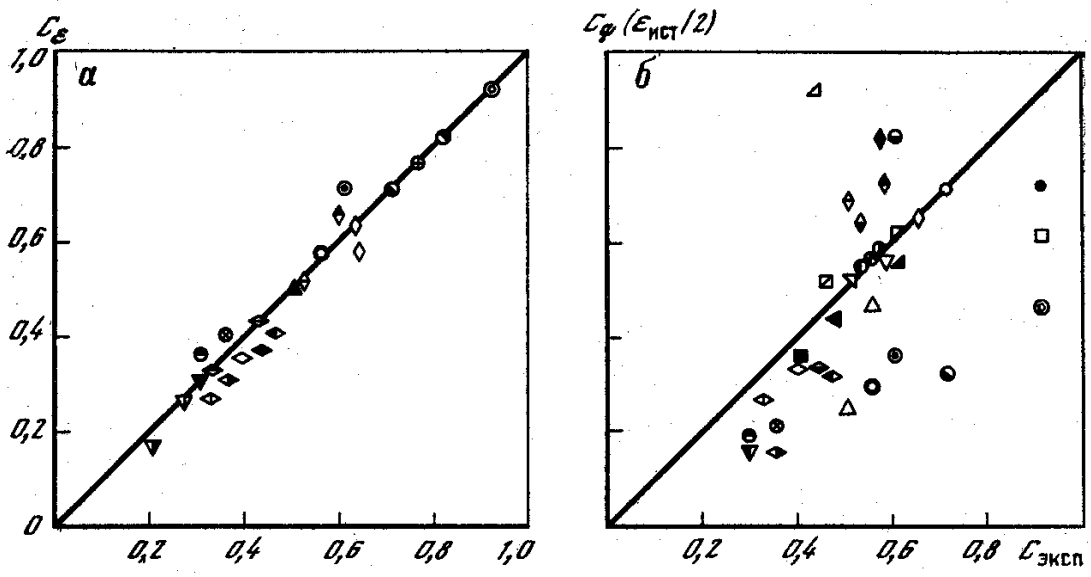


Рис.3. Корреляция пластичности $\varepsilon = C_\varepsilon$ (а), ответственной за разрушение, и постоянной Коффина C_φ (б) с экспериментальными данными.

Относительное сопоставление пластических деформаций в циклах жесткого наеружения с предельной пластичностью при однократном разрушении позволяет представить результаты эксперимента в виде единой кривой малоциклового нагружения в координатах $\delta/\varepsilon - N_p$ (рис. 4).

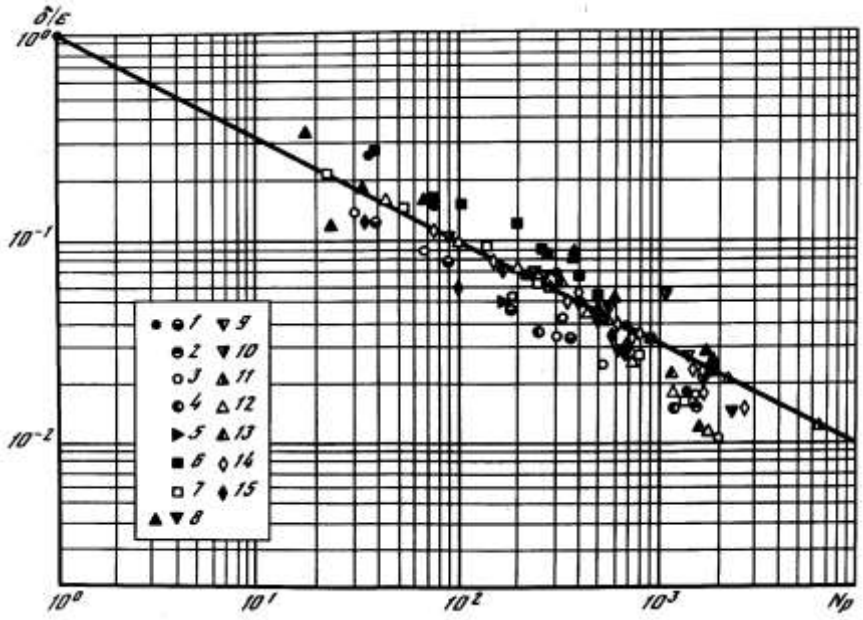


Рис.4. Единая кривая усталости металлических материалов при жестком нагружении.

При мягком нагружении для материалов одного и того же класса или для одного и того же материала при различных температурах (за исключением интервала температур интенсивного деформационного старения) также может быть построена единая кривая малоцикловой усталости в координатах $\sigma_a/\sigma_b - N_p$, как это показано для стали ТС на рис. 5.

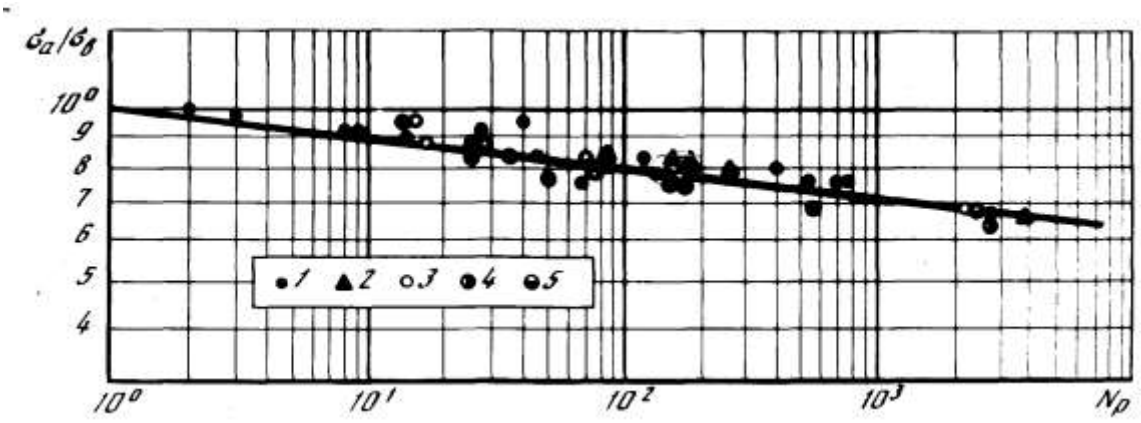


Рис.5. Единая кривая малоцикловой усталости стали ТС (r_σ = -1) при различных температурах мягкого нагружения 1 – 20^{0}С, 2 – 270^{0}С, 3 – 350^{0}С, 4 – 450^{0}С, 5 – 550^{0}С

Возникновение поля остаточных микронапряжений при циклическом упругопластическом деформировании конструкционных металлических материалов вызывает изменение их измеряемых модулей упругости (рис.6,б) и неупругой деформации (рис. 6,а) в полуциклах растяжения (черные точки) и полуциклах сжатия (светлые точки).

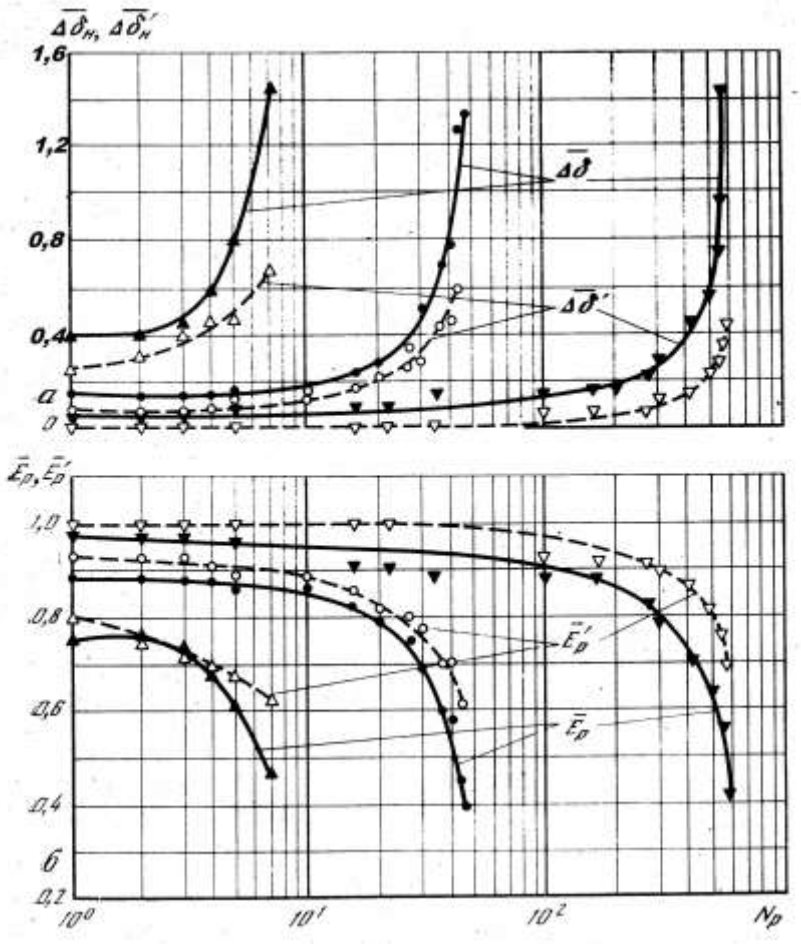


Рис.6. Характер изменения неупругой деформации и модуля упругости (при разгрузке) с ростом числа циклов нагружения.

При циклическом нагружении коэффициент поперечной деформации является функцией уровня упругопластической деформации в полуциклах и числа циклов нагружения (уровня повреждения), и его значения (рис.7) могут быть для конструкционного материала как ниже 0,3 (в упругой области) так и выше 0,5 (в пластической области). Структурная и деформационная неоднородность также способствует отклонению коэффициента поперечной деформации от теоретических значений.

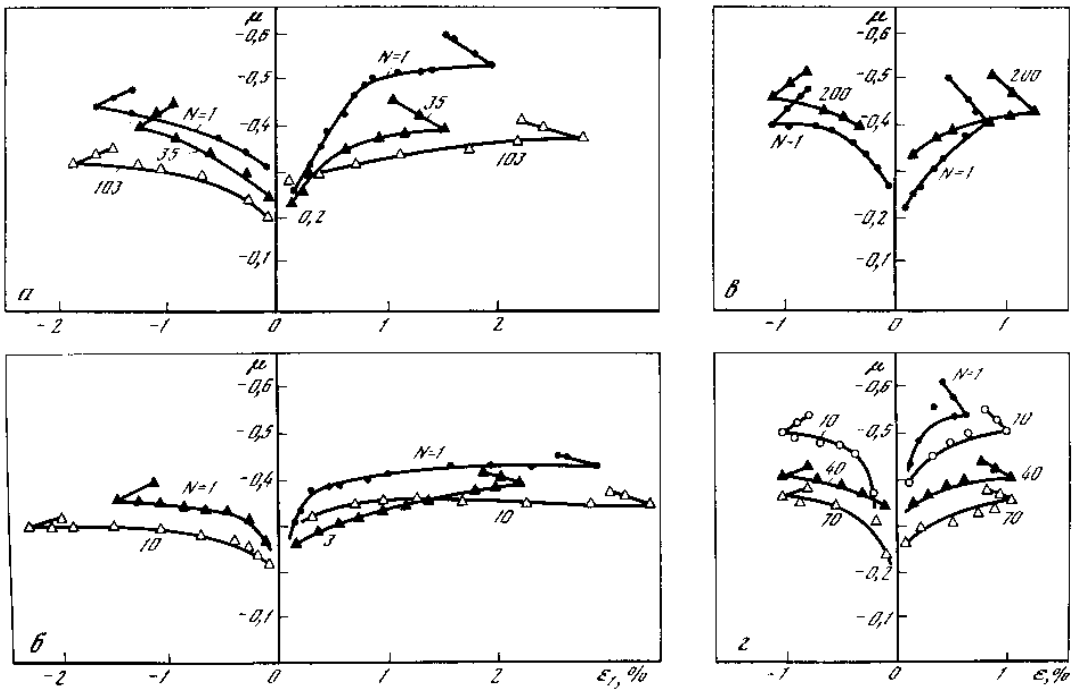


Рис.7. Изменение коэффициента поперечной деформации при мягком нагружении стали Х18Н10Т (а – Т = 20^0С, б – 650^0С) и жестком (в – Т = 20^0С; г – Т = 650^0С).

Характеристики циклического деформирования находятся также в прямой связи с изменениями микротвердости материала.

Проведенные исследования показали, что изменение микротвердости, также как и ширина пели гистерезиса, в процессе циклического нагружения определяется величиной нагрузки (деформации) и исходным структурным состоянием материала. Для стали ТС в состоянии поставки (нормализация) первые циклы нагружения характеризуются упрочнением материала (кривая 1 на рис.8). При этом степень упрочнения зависит от величины циклической деформации, это справедливо как для мягкого, так и для жесткого нагружения. Сопоставление кривых 1-3 (рис.8) показывает, что малые деформации вызывают меньшее упрочнение материала одного и того же структурного состояния. При данных амплитудах деформаций степень упрочнения в первые циклы нагружения (для стали ТС это составляет около 10 первых циклов) определяется исходным состоянием материала. Отожженный образец стали ТС упрочняется значительно сильнее (кривая 4), чем образцы из стали в нормализованном состоянии (кривые 1. 2 и 3).

Как следует из рис. 8, чем выше нагрузка (на рис.8 нагрузки показаны в относительных величинах: действующее напряжение отнесено к пределу текучести материала в заданном структурном состоянии), тем значительнее упрочнение (увеличение микротвердости) материала.

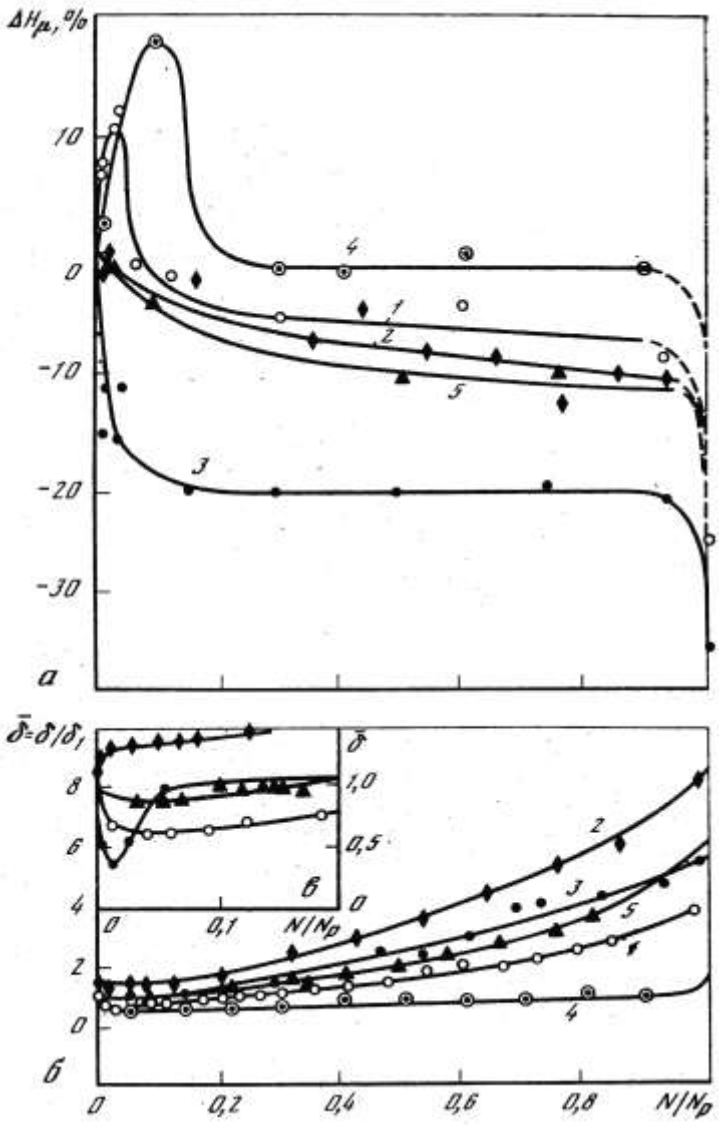


Рис. 8. Изменение микротвердости стали ТС при мягком нагружении:
1 - $\bar{\sigma}$ = 1,4; N_p = 164 циклов; H_μ = 2120 МПа; 2 - $\bar{\sigma}$ = 1,15; N_p = 920; H_μ = 2150; 3 - $\bar{\sigma}$ = 1,05; N_p = 2032; H_μ = 2220; 4 - $\bar{\sigma}$ = 1,26; N_p = 50; H_μ = 1500, отжиг; 5 - $\bar{\sigma}$ = 2,7; N_p = 60; H_μ = 1530, отжиг + 5% деформации + 90^{0}С, 1 ч.

Кривая 4 на рис.8,а получена при испытании отожженного, а затем деформированного растяжением на 7,5% образца. Уже первые циклы нагружения при напряжении $\bar{\sigma}$ = 1,26 вызвали разупрочнение материала (уменьшение микротвердости и расширение петли гистерезиса), и даже после первого цикла нагружения не наблюдалось упрочнения.

Статическое растяжение на 5% с последующим старением образца при температуре 90^{0}С в течение 1 ч также обусловило непрерывное циклическое разупрочнение материала без упрочнения в первых циклах нагружения (кривая 5 на рис.8,а) при напряжении $\bar{\sigma}$ = 2,7.

Второй участок кривой 5, имеющей начальное упрочнение, характеризуется интенсивным разупрочнением материала с последующей стабилизацией микротвердости (рис.8,а). Деформация в этом случае сопровождается образованием грубых полос скольжения в отдельных зернах. С началом разупрочнения, определяемого уменьшением микротвердости, наблюдается увеличение ширины петли гистерезиса и начинается одностороннее накопление деформации. На первом участке, когда имеет место упрочнение, происходит сужение петли

гистерезиса. Причем, чем выше действующее напряжение, тем интенсивнее сужение петли при упрочнении и расширение ее или накопление деформаций при разупрочнении.

Измерения в зоне трещины показывают, что микротвердость в ней ниже, чем средняя микротвердость. При квазистатическом типе разрушения не наблюдалось образования микротрещин вплоть до разрушения – накопление повреждений (уменьшение сечения за счет сужения опережало накопление повреждений за счет трещин). Смешанному типу свойственно как образование шейки, так и возникновение микротрещин на второй стадии нагружения, характеризующейся падением и дальнейшей стабилизацией микротвердости.

Описанные выше закономерности изменения микротвердости справедливы и для числа циклов разрушения более 10^3. Однако меньшие действующие напряжения вносят ряд особенностей в данный процесс. В частности, при большой исходной пластичности (кривая 1, рис.9,а) отожженного образца стали ТС напряжение $\bar{\sigma} = 1{,}69$ в условиях жесткого нагружения обеспечивает стабильную микротвердость в течение 90% от общей долговечности образца.

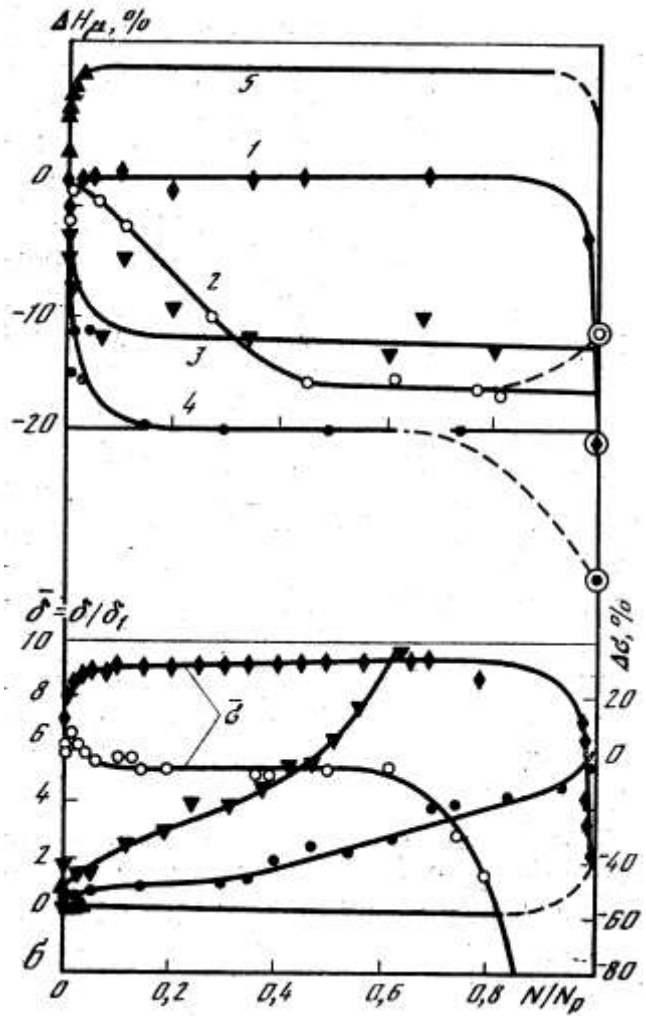


Рис. 9. Изменение микротвердости для стали ТС в зависимости от структурного состояния: 1 —σ= 260 МПа, $N_р$ = 2045 циклов, $H_μ$ = 1770 МПа, отжиг + деформация, 2 —σ= = 204, $N_р$ = 5572, $H_μ$ = 1950, отжиг + деформация; 3 —σ= = 360, $N_р$ = 7932, $H_μ$ = 1800, нормализация; 4 — σ = 484, $N_р$ = = 2032, $H_μ$ = 2220, нормализация; 5 - σ= 314, $N_р$ = 2620, $H_μ$ = 1670, отжиг.

Упрочнение при этом наблюдалось лишь в течение первых 10-12 циклов. Дальнейшее разупрочнение, по-видимому, компенсировалось возникающим упрочнением. Разупрочнение наблюдалось только в последние циклы нагружения. Особенно интенсивным оно было в зоне макротрещины.

При уменьшении напряжений эффект упрочнения снижается и происходит медленное снижение микротвердости с последующей ее стабилизацией (кривая 2 на рис.9,а). При этом, поскольку в зоне развития макротрещины действовали большие напряжения и образец обладал еще значительной пластичностью (образец был отожжен), микротвердость в зоне развития макротрещины оказалась выше средней.

Испытание образцов в нормализованном состоянии (кривые 3 и 4) при напряжениях $\overline{\sigma}$ = 1 и 1,05 сопровождалось разупрочнением материала и микротвердость снижалась уже после первого цикла нагружения.

Следует заметить, что при малых напряжениях петля изменяется интенсивнее по сравнению с исходной петлей (петлей первого цикла), чем при больших напряжениях (рис.8,б и 9,б). Сталь 22к относится к типу стабилизирующихся материалов. После упрочнения в первых циклах нагружения в дальнейшем петля остается почти неизменной вплоть до разрушения образца (рис.10). При этом происходит одностороннее накопление деформаций (рис.10,б).

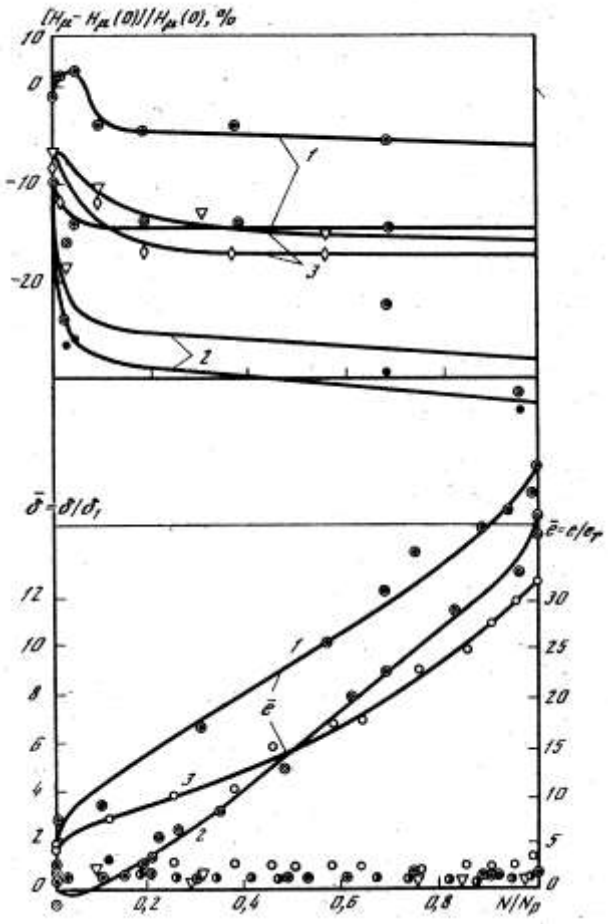


Рис. 10. Изменение микротвердости стали 22к при мягком нагружении 1 — $\overline{\sigma}$ = 1,67, N_p — 322 цикла; H_μ = 1410 МПа; 2 — $\overline{\sigma}$ = 1,34; N = 1422, H_μ = = 1470; 3 — $\overline{\sigma}$ = 1,18, N_p = 5267, H_μ = 1570 МПа.

Измерение микротвердости данной марки стали показало, что в течение нескольких первых циклов нагружения наблюдается увеличение микротвердости, и, также как и для стали ТС, большим напряжениям соответствуют большие степени упрочнения. Причем чем больше действующее напряжение при мягком нагружении, тем большую долю разрушающего числа циклов протекает процесс упрочнения. После падения микротвердости происходит ее стабилизация при некотором дальнейшем снижении вплоть до разрушения. В случае действия больших напряжений микротвердость может оставаться выше исходной, как это наблюдалось на образце, испытанном при напряжении $\overline{\sigma}$ = 1,66 (кривая 4 на рис.10,а).

Измерение изменений микротвердости отдельных составляющих структуры стали 22к под действием циклической нагрузки показывает, что при высоких уровнях напряжений ферритные зерна упрочняются, а перлитные разупрочняются. При малых уровнях нагрузки и больших долговечностях разупрочняются как перлитные, так и ферритные зерна. Существуют промежуточные уровни напряжений, при которых незначительно упрочняются как ферритная, так и перлитная составляющие структуры.

В условиях жесткого нагружения сталь 22к при больших уровнях нагрузки, как правило, находится вплоть до разрушения в упрочненном состоянии (кривые 1 и 2 на рис.19,а). В то время как для мягкого нагружения наблюдается либо падение микротвердости по сравнению с исходным значением, либо незначительное повышение ее (кривые 1 и 2 на рис.11,а соответственно).

Меньшие действующие деформации вызывают более интенсивное разупрочнение стали 22к (кривая 3 на рис.11), и микротвердость разрушенного образца оказывается ниже исходной.

Изменение микротвердости сталей ТС и 22к в зависимости от ширины петли или накопленной деформации также показывает, что процесс упругопластического деформирования не является монотонным, а протекает в три стадии (рис. 12). Первая из них характеризуется упрочнением материала с образованием полос скольжения и протекает в первые 10-15 циклов нагружения. Вторую стадию отличает интенсивное разупрочнение материала, связанное либо с накоплением пластических деформаций и образованием грубых полос скольжения, когда имеет место квазистатическое разрушение, либо циклических повреждений в виде микротрещин, когда разрушение имеет усталостный характер. На второй стадии нагружения идет накопление деформаций, а также статических и циклических повреждений. Третья стадия связана с развитием магистральной трещины и окончательным разрушением образца. При этом идет сильное накопление деформаций в случае мягкого нагружения или снижения нагрузки (при нагружении жестком) без существенного изменения микротвердости.

Измерения микротвердости показали также, что изменения микротвердости при циклическом нагружении могут быть использованы и для оценки степени поврежденности материала, и для качественного описания изменений деформационных циклических характеристик в процессе нагружения. Кроме того, данные по исходной микротвердости материала позволяют охарактеризовать степень неоднородности развития деформаций при циклическом нагружении и использовать характеристики неоднородности для оценки долговечности на стадии рассредоточенного трещинообразования [2, 14, 15]. Последнее, в свою очередь, позволяет более обоснованно назначать запасы прочности на стадии проектирования и решать вопрос о продлении ресурса эксплуатируемых конструкций.

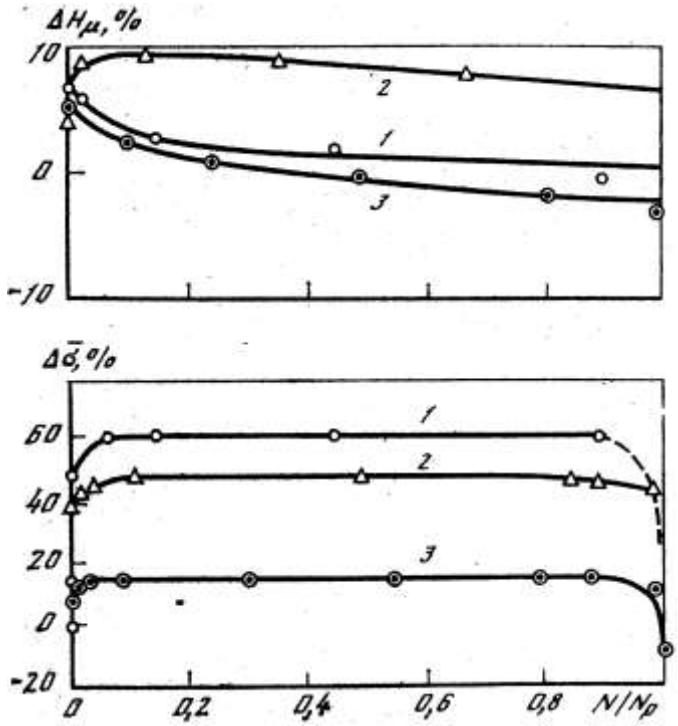


Рис. 11. Изменение микротвердости стали 22к при жестком нагружении:
1 — $\bar{\sigma}$ = 1,17, N_p = 340 циклов, H_{μ} = 715; 2 — $\bar{\sigma}$ =1,24, N_p = 226, e(o) = 9,15; 3— $\bar{\sigma}$ =1,10, N_p — 1651, e(o) = 6,3.

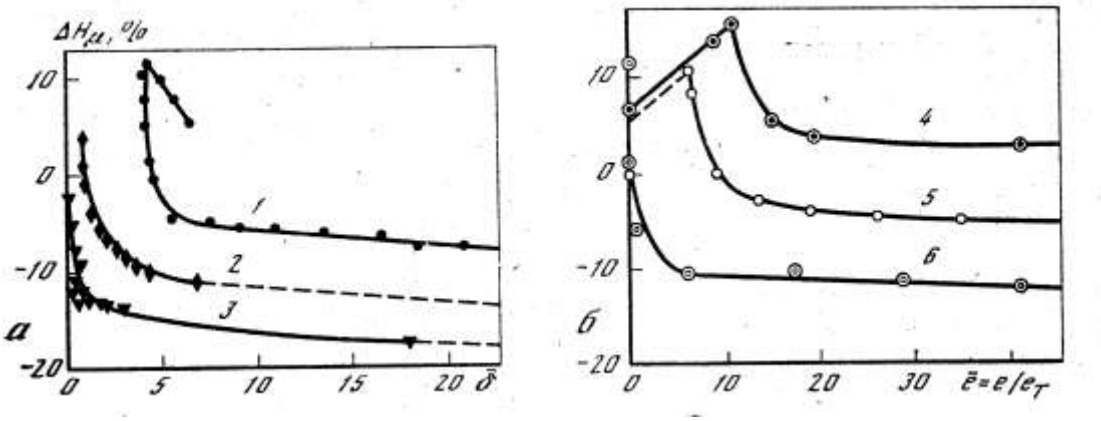


Рис. 12. Изменение микротвердости сталей ТС и 22к в зависимости от уровня деформации 2 — $\bar{\sigma}$ = 1,4, N_p = 164 циклов, H_{μ} = 2100 МПа; 2 — $\bar{\sigma}$ = 1,15, N_y = 920, H_{μ} – 2150 3 — $\bar{\sigma}$ = 1,09, N_p = 7932, H_{μ} = 1794; 4 — $\bar{\sigma}$ = 1,67, N_p = 322, H_{μ} = 1620; 5 = $\bar{\sigma}$ = = 1,5, N_p = 799, H_{μ} = 1510; 6 — $\bar{\sigma}$ = 1,34, N = 1472, H_{μ} = 1650 МПа

Список литературы

1. Романов А.Н. Проблемы материаловедения в механике деформирования и разрушения на стадии образования трещин. Часть 1// «Вестник научно-технического развития: Интернет-журнал» . — 2013. —№11. — 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: Интернет-журнал» . — 2014. —№1. — 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: Интернет-журнал» . — 2014. —№ 2. — 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: Интернет-журнал» . — 2014. —№3. — 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: Интернет-журнал» . — 2014. —№9. — 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: Интернет-журнал». — 2015. —№ 3. — 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: Интернет-журнал» . — 2015. — № 5. —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: Интернет-журнал» . — 2015. —№ 6. — 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: Интернет-журнал», 2015. — —№ 12. — 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// «Вестник научно-технического развития: Интернет-журнал» . — 2016. —№ 1. — С. 34-41.
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: Интернет-журнал» . — 2016. —№3. —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: Интернет-журнал». — 2016. —№2. — С. 16-22.
13. Романов А.Н. Проблемы материаловедения в механике деформирования и разрушения на стадии образования трещин: Часть 13. Критерии разрушения при неоднородном напряженном состоянии// «Вестник научно-технического развития: Интернет-журнал». — 2016. —№9. — С. 29-36.
14. Романов А.Н. Разрушение при малоцикловом нагружении. — М.: Наука, 1988. — 280 с.
15. Романов А.Н. Критерии усталостного разрушения // Инженерный журнал «Справочник», Приложение. — 2007. — №6. —36 с.

Дата поступления статьи – 27 марта 2017 года