УДК 621.539.43.001.24

ПРОБЛЕМЫ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ В МЕХАНИКЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ НА СТАДИИ ОБРАЗОВАНИЯ ТРЕЩИН

Часть 9. Малоцикловая усталость конструкционных металлических материалов

© Александр Никитович Романов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Россия, Москва
alrom37@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены закономерности упругопластического деформирования и разрушения конструкционных металлических материалов при малоцикловом циклическом нагружении на стадии образования трещин.
Показано существование обобщенной кривой циклического деформирования, а также единого критерия усталостного разрушения, не зависящего от условий нагружения. Исследованы структурная и деформационная неоднородность при циклическом нагружении и показана возможность оценки деформационной неоднородности по параметрам структурной неоднородности, обуславливающей образование микротрещин. Дано описание предельных состояний образования микротрещин (рассредоточенное трещинообразование) и макротрещин (магистральных трещин).

Ключевые слова: критерий разрушения, накопление повреждений, предельное состояние, малоцикловая и многоцикловая усталость, долговечность, остаточные микронапряжения, энергия разрушения, структурная и деформационная неоднородность, рассредоточенное трещинообразование, циклический эффект Баушингера, обобщенная кривая циклического деформирования, образование микротрещин.

ВВЕДЕНИЕ

Значительное число современной техники, обладающей, как правило, высокой металлоемкостью, работает в экстремальных условиях: высокая силовая нагруженность, высокие температуры, вибрационные воздействия, агрессивная среда, переменные нагрузки, вызывающие во многих случаях в зонах концентрации напряжений значительные пластические деформации, многократное повторение которых приводит к накоплению повреждений (трещин) и в конечном счете - к разрушению. Исследование закономерностей развития разрушения на различных стадиях циклического деформирования и описании предельных состояний на основе использования критериев линейной и нелинейной механики разрушения, а также на использовании феноменологических подходов, основанных на экспериментальных данных, является важной фундаментальной научной и практической проблемой.

Повышение надежности и долговечности деталей машин и конструкций требует разработки и обоснования уточненных методов расчета долговечности как на стадии проектирования, так и на стадии эксплуатации изделий, работающих при экстремальных условиях нагружения. Кроме того, уточненные методы расчетов необходимы также для обоснования возможности (невозможности) продления ресурса для изделий, отработавших свой ресурс.

Создание таких методов требует исследования закономерностей поведения конструкционных материалов на основе проведения экспериментальных исследований при нагружениях в условиях, приближенных к эксплуатационным.

Как известно, действие переменных нагрузок приводит в процессе эксплуатации к накоплению повреждений и, в конечном счете, по прошествии определенного времени - к разрушению деталей.

Обеспечение надежности машин в процессе эксплуатации на заданный срок службы связано с корректной оценкой долговечности деталей в указанных условиях нагружения на основе использования критериев разрушения.

В настоящей работе на основе экспериментальных данных выполнен анализ закономерностей образования (трещин) при малоцикловом нагружении в широком диапазоне температур и предложен единый для стадии образования энергетический критерий (в деформационных терминах) усталостного разрушения металлических материалов, основанных на представлении о повреждающей роли микронапряжений на пути упругой и пластической деформации. Предложенный критерий является общим и позволяет описать предельные состояния (разрушение) для любых материалов независимо от условий нагружения. Кроме того, он позволяет оценивать степень повреждения деталей на любой стадии эксплуатации. Критерий позволяет также описать стадию рассредоточенного трещинообразования на основе исследования структурной и деформационной неоднородности конструкционных металлических материалов при циклическом упругопластическом деформировании.

Критерий дает возможность осуществлять уточненные методы расчета долговечности и уровней накопленных повреждений на любой стадии нагружения, а также обосновывать возможность продления ресурса конструкций, отработавших свой ресурс.

Основные экспериментально выявленные автором закономерности и особенности циклического деформирования и разрушения, а также структурных изменений при этом различных конструкционных материалов в широком диапазоне температур и долговечностей на стадии образования трещин описаны ранее [1-8]. Ниже кратко представлены основные из них.

1. Сопротивление деформированию и разрушению конструкционных металлических материалов

Расчет предельных состояний (образование трещины) элементов конструкций осуществляется на основе использования экспериментальных данных о сопротивлении материалов циклическому деформированию и разрушению. При этом конструкционные металлические материалы сопротивляются деформированию и разрушению в зависимости от условий нагружения и структурного состояния материала.

1.1. Сопротивление деформированию при нормальных и высоких температурах

Конструкционные металлические материалы, испытывающие переменные нагрузки в процессе эксплуатации, в зависимости от структурного состояния и действующей температуры могут либо упрочняться (ширина петли гистерезиса при мягком нагружении - нагружение с заданной нагрузкой в циклах - уменьшается, при жестком нагружении - нагружение с заданным перемещением в циклах - напряжение с ростом числа циклов увеличивается), либо разупрочняться (при мягком нагружении ширина петли гистерезиса возрастает с ростом числа циклов нагружения, а при жестком нагружении рост числа циклов нагружения сопровождается падением напряжения в циклах), либо оставаться стабильными, демонстрируя постоянство параметров деформирования (ширины петли гистерезиса или напряжения в циклах) в течение большей части срока эксплуатации. Практически все конструкционные материалы в состоянии поставки на начальной стадии упрочняются, а на заключительной (предразрушение) – разупрочняются. В соответствии с этим материалы подразделяются на циклически упрочняющиеся, разупрочняющиеся и стабильные.

Как было показано ранее [1], тип материала (упрочняющийся, разупрочняющийся или циклически стабильный) может быть определен по кривым статического растяжения (рис.1).

Если об упрочнении или разупрочнении судить по изменению условных напряжений, величина которых зависит от истинного сечения образца, то для циклически упрочняющихся материалов при статическом нагружении практически до момента разрушения наблюдается рост условных напряжений (кривая 1 на рис.1, а), т.е упрочнение материала за счет пластической деформации протекает более интенсивно, чем разупрочнение за счет уменьшения сечения. У разупрочняющихся материалов большая доля накопления деформаций ($\varepsilon_b < 0{,}5\varepsilon_{общ.}$, где ε_b - деформация, соответствующая пределу прочности σ_b) при статическом нагружении сопровождается падением условных напряжений (кривая 2 на рис.1,а). Для циклически стабилизирующегося материала (кривая 3 на рис.1,а) имеют место практически равные участки упрочнения (роста напряжений) и разупрочнения (падения напряжений), т.е. ($\varepsilon_b = 0{,}5\ \varepsilon_{общ.}$). Причем, как и при циклическом деформировании, начальная стадия статического растяжения у всех типов материалов характеризуется упрочнением (ростом напряжений до σ_b).

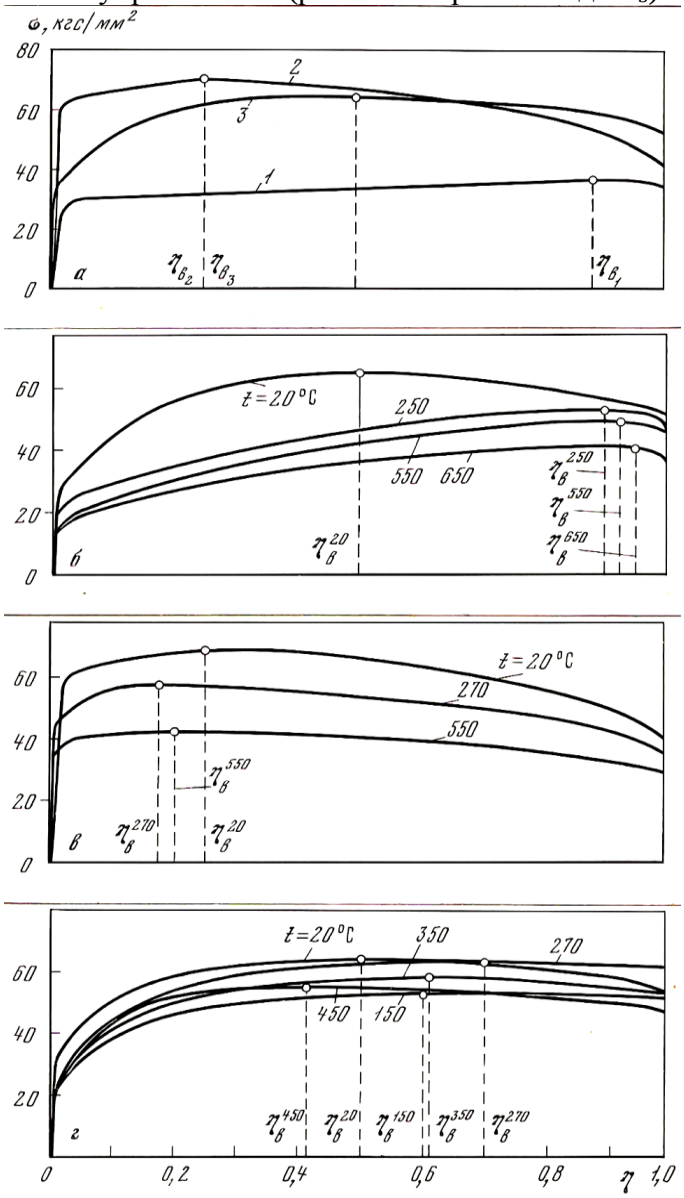


Рис.1. Кривые статического растяжения при 20^0С (а: 1 - АД-33, 2 - сталь ТС, 3 - сталь 22к) и в диапазоне температур сталей Х18Н10Т (б), ТС (в), 22к (г).

Температурные условия нагружения, как правило, изменяют характер поведения материала. Циклически стабильные при испытании при повышенных температурах склонны к упрочнению, как это можно видеть по кривым на рис.1,б и рис.2,а для аустенитной стали Х18Н10Т, являющейся циклически стабильной при комнатной температуре (кривые 1 на рис.1,б и рис.2,а).

Увеличение температуры испытания этой стали резко увеличивает значение равномерной деформации ε_b на кривых статического растяжения. Причем стадия упрочнения увеличивается с повышением уровня температуры ($\eta_b^{650°} > \eta_b^{550°} > \eta_b^{250°} > \eta_b^{20°}$). Увеличение η_b с ростом температуры испытания для данной стали связано с тем, что процесс ее деформационного старения усиливается с ростом температуры испытания и является максимальным при температурах 600° - 700°С. Следует заметить, что по кривым статического растяжения при повышенных температурах можно также определить, склонен ли материал к деформационному старению и как велика интенсивность его проявления.

Известно, что развитие процессов старения протекает во времени и может быть интенсифицировано пластической деформацией: чем меньше уровень деформации, тем больше времени необходимо для получения определенной степени старения материала, и наоборот, большим уровням деформаций соответствуют меньшие времена для достижения заданной степени старения.

В начальный момент статического нагружения с ростом нагрузки до значения, соответствующего пределу пропорциональности, процесс деформационного старения или совсем не проявляется или протекает слабо, и значения пределов пропорциональности зависит только от температуры испытания. С началом развития пластической деформации интенсифицируется процесс деформационного старения, вызывая упрочнение материала, В результате при температуре интенсивного протекания деформационного старения наблюдается непропорциональное снижение предела пропорциональности и предела прочности по сравнению с их значениями при комнатной температуре. В результате интенсивного протекания деформационного старения (рис.1,б).

Теплоустойчивая сталь ТС, являющаяся разупрочняющимся материалом при комнатной температуре (кривые на рис.1,в и рис.2,б), остается разупрочняющейся и при повышенных температурах. При этом с увеличением температуры испытания длительность стадии разупрочнения увеличивается ($\eta_b^t < \eta_b^{20°}$) - кривые на рис.1,в и рис.2,б.

Сталь 22к является стабилизирующимся деформационно стареющим материалом. Температура интенсивного протекания деформационного старения составляет 250° - 350°С. Как видно из рис.1,г, при температурах испытания до 350° С наблюдается увеличение η_b по сравнению с комнатной температурой. При 450°С, когда сталь 22к проявляет уже свои реологические свойства, преобладает процесс разупрочнения ($\eta_b^{450°} < \eta_b^{20°}$).

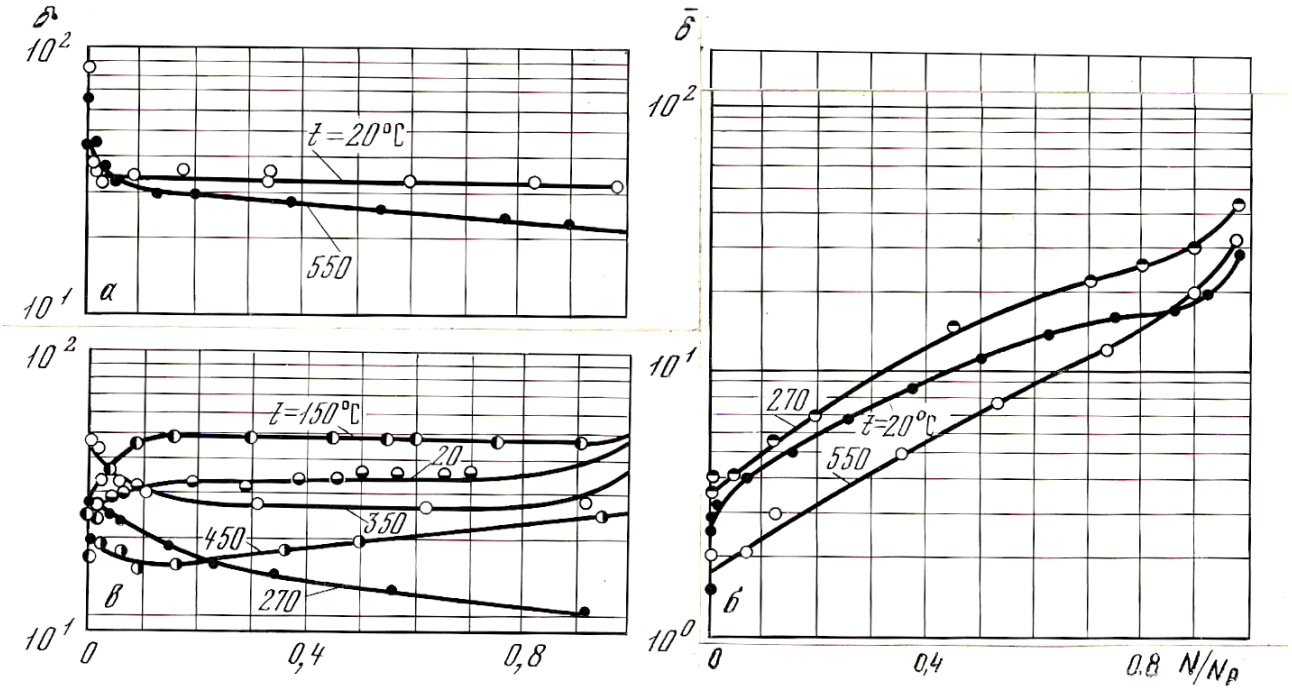


Рис.2. Изменение ширины петли гистерезиса сталей Х18Н10Т (а), ТС (б) и 22к (в) в зависимости от температуры испытания.

Таким образом, длительность стадий циклического упрочнения, разупрочнения и стабилизации для металлических материалов может быть оценена по кривым статического растяжения, представленных в координатах «условное напряжение (или нагрузка) - статическое повреждение $\eta = \varepsilon/\varepsilon_{общ}$.». При этом длительность стадии упрочнения характеризуется величиной $\eta_b = \varepsilon/\varepsilon_{общ}$. Для упрочняющихся материалов $\eta_b > 0,5$, для разупрочняюшихся $\eta_b < 0,5$ и для циклически стабилизирующихся $\eta_b \cong 0,5$, т.е. длительность стадий упрочнения, рарупрочнения и стабилизации при циклическом нагружении определяется соответственно соотношениями $\eta_b/(\varepsilon_{общ} - \eta_b)$.

Как было отмечено выше, характер поведения материала определяет темп накопления повреждений.

Темп накопления повреждений определяется характеристиками сопротивления конструкционных материалов и их изменениями в процессе циклического нагружения.

1.2. Обобщенные диаграммы циклического упругопластического деформирования металлических материалов

В отличие от существующих подходов наиболее оправданным является подход, заключающийся в сопоставлении диаграмм деформирования на равных стадиях повреждения η материала .

Это означает, что для каждого материала при различных постоянных амплитудах нагрузки для одинаковых уровней накопленных повреждений существует единая кривая циклического деформирования.

. Как видно из рис.3, сопоставление экспериментальных данных подтверждает существование для рассматриваемых материалов обобщенной диаграммы циклического деформирования независимо от степени исходной деформации $\bar{e}^{(0)}$ (долговечности).

1.3. Сопротивление разрушению при циклическом упругопластическом деформировании.

Характеристики сопротивления материалов циклическому упругопластическому деформированию зависят от условий нагружения (температура, частота нагружения,

асимметрия цикла, двухчастотное нагружение, выдержка под нагрузкой), уровня нагрузки (деформации), вида нагружения (мягкое- с заданным уровнем нагрузки в полуциклах, жесткое – с заданным размахом упругопластической деформации в цикле) и уровня накопленных повреждений.

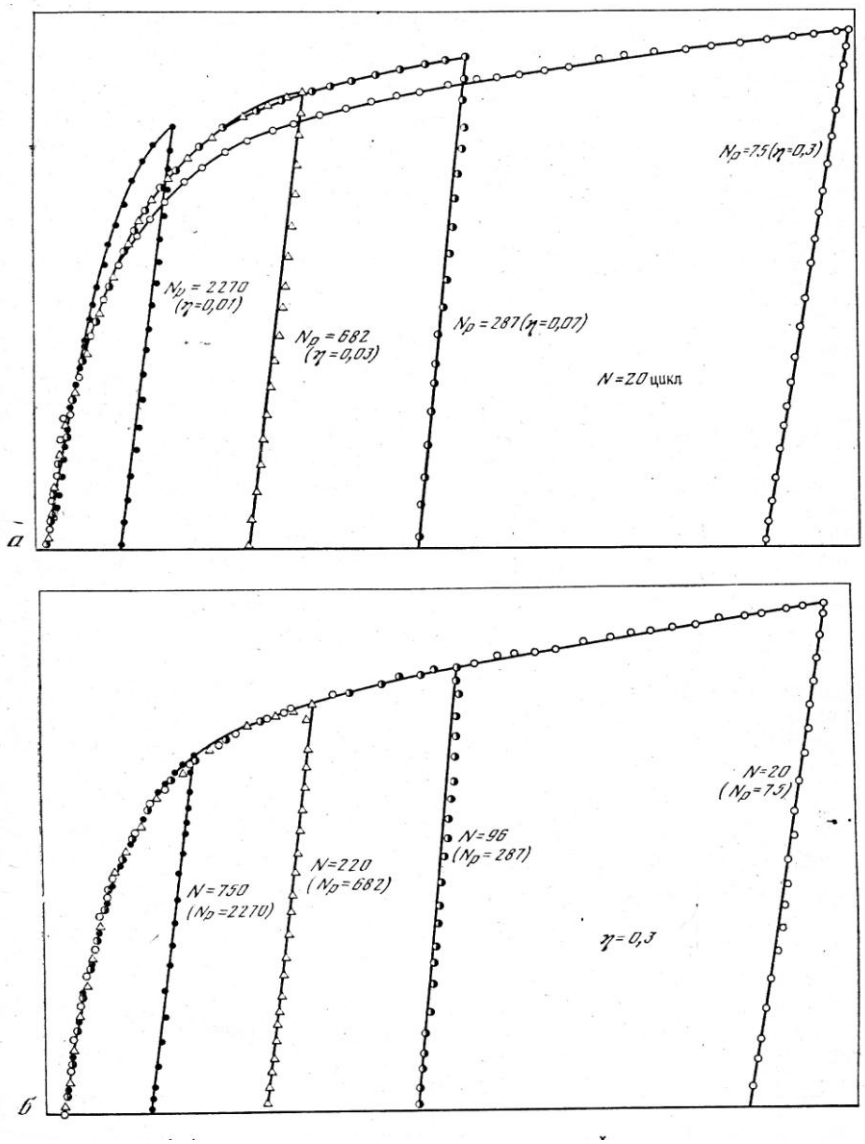


Рис. 3. Обобщенная диаграмма циклического деформирования при мягком и жестком нагружении

При высоких температурах в процессе нагружения могут протекать значительные структурные изменения (например, деформационное старение), интенсивность которых зависит от температурно-временных и силовых воздействий.

Один и тот же материал в зависимости от структурного состояния (термообработки) может быть упрочняющимся (например, после отжига), разупрочняющимся (например, после закалки с низким отпуском) и циклически стабильным.

При высоких температурах существенным фактором, сопровождающим процесс деформирования и оказывающим влияние на изменение механических свойств материала, а связи с этим и на кинетику деформационных характеристик, является структурное изменение материала: деформационное старение, собирательная рекристаллизация, полигонизация, а

также проявление их реологических свойств (ползучесть, релаксация), интенсивность протекания которых зависит от уровня нагрузки, температуры и времени.

На рис. 4 показаны результаты испытаний при мягком нагружении трех сталей – 22к, ТС и Х18Н10Т при различных температурах испытания.

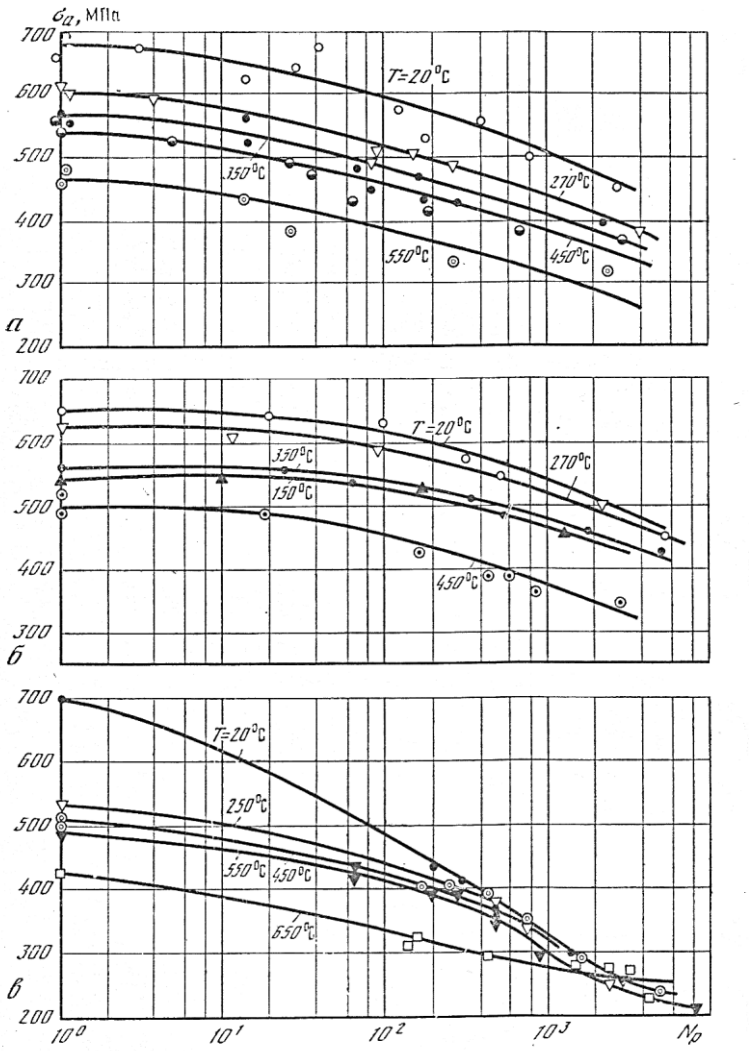


Рис. 4. Сопротивление усталости сталей ТС (а), 22к (б) и Х18Н10Т (в) для различных температур испытания

Видно, что для разупрочняющейся стали ТС во всем диапазоне температур наблюдаеся снижение сопротивления разрушению рис. 4,а). Сталь 22к в результате интенсивного деформационного старения при тепературе 150^0С показала более низкое сопротивление усталости, чем при температурах 270^0С и 350^0С (рис. 4,б). Сталь Х18Н10Т вслествие деформационного старения при повышенных температурах проявляет менее интенсивное падение разрушающих уровней напряжений в одном и том же диапазоне долговечностей.

При жестком малоцикловом нагружении сопротивление разрушению при долговечности до 10^4 циклов определяется пластичностью и темпом ее исчерпания. Влияние температур испытания на долговечность стали ТС при этом режиме нагружения невелико (рис. 5**).** Сопротивление разрушению стареющей аустенитной стали Х18Н10Т с повышением температуры испытаний снижается. Сопротивление разрушению деформационно-стареющей стали 22к с повышением температуры испытаний до 250-270^0С уменьшается вследствие снижения пластичности.

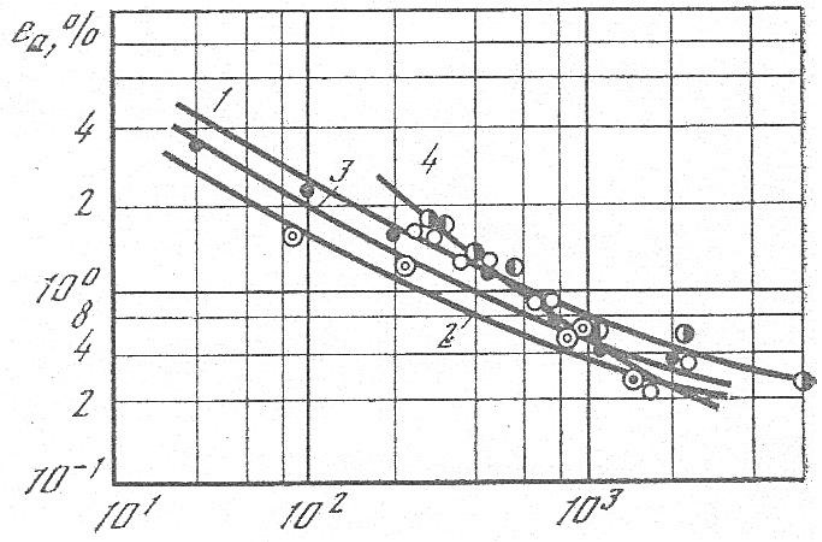


Рис. 5. Кривые усталости стали ТС при жестком нагружении
1 – 20^0C, 2 – 350 и 450, 3 – 550^0C

2. Закономерности усталостного разрушения конструкционных материалов

В течение многих десятилетий наряду с изучением характеристик сопротивления конструкционных материалов деформированию и разрушению при циклическом нагружении проводились также исследования по разработке критериев разрушения для оценки прочности машин, оборудования и конструкций различного назначения с использованием силовых, деформационных и энергетических подходов, и каждый из подходов насчитывает к настоящему времени десятки предложений по критериальным зависимостям [1]. Следует отметить, что существующие критерии, как правило, либо являются уравнениями кривой усталости конкретного материала и заданных условий нагружения и потому не могут быть распространены на другие материалы и иные условия испытаний, либо для очень ограниченного числа материалов и условий нагружения, что по-прежнему требует получения большого количества экспериментальных данных.

2.1. Энергия статического и циклического разрушения материалов.

Выполненные измерения энергии [5,9,10], затрачиваемой на циклическое и статическое разрушение образцов из исследованных сталей 22к, теплоустойчивой перлитной стали ТС, а также алюминиевого сплава АД-33, нержавеющей стали Х18Н9Т и других подтвердили, что энергия, затрачиваемая на циклическое разрушение указанных материалов, в десятки раз превышают энергии их статического разрушения, причем, чем больше долговечность, тем большая энергия затрачивается на деформирование (рис. 6,а).

В настоящем исследовании выполнен баланс затрачиваемой энергии на деформирование и разрушение с определением долей тепловой, повреждающей и механической энергии. При этом использовалось представление о повреждающей роли остаточных микронапряжений, которые оценивались по циклическому эффекту Баушингера. Впервые, в отличие от статического, измеряемого при однократном (исходном) цикле, изучен эффект в последующих циклах и назван автором как циклический эффект Баушингера. Врезультате показано, что усталостное разрушение образца затрачиватся постоянная энергия разрушения (рис.6,б).

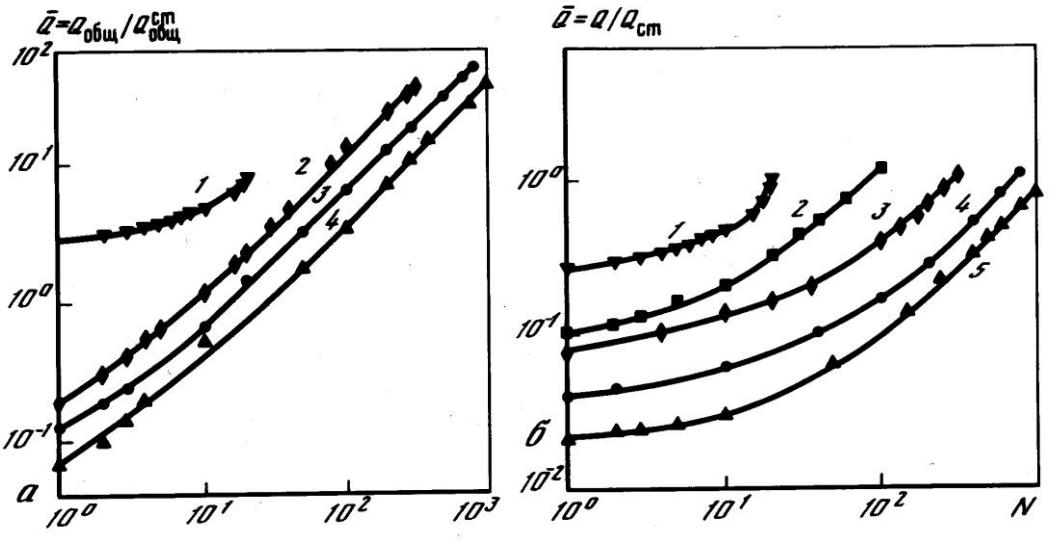


Рис.6. Зависимость суммарной поглощенной энергии (а) и повреждающей энергии (б) от числа циклов разрушения для стали 22к.

2.1. Циклический эффект Баушингера.

Как следует из рис.7, в зависимости от циклического поведения материала предел текучести (пропорциональности) увеличивается для упрочняющегося материала, уменьшается для разупрочняющегося и остается практически неизменным для циклически стабильного материала большую долю долговечности [6,9,10]. Начальное нагружение (первый цикл) сопровождается эффектом Баушингера (предел текучести в полуцикле сжатия для разупрочняющегося и стабильного материала снижается после пластического деформирования в полуцикле растяжения). Как показывают наши исследования (рис.7), имеет место эффект Баушингера в каждом цикле нагружения, названный нами циклическим эффектом Баушингера, который в отличие от статического, как правило меньшей величины. При этом предел пропорциональности в полуцикле растяжения всегда большей величины, чем в полуцикле сжатия, даже если нагружение начать с полуцикла сжатия, как это следует из рис.7. Реализовать обратный эффект, чтобы в полуциклах сжатия предел пропорциональности был выше, чем в полуциклах растяжения, невозможно.

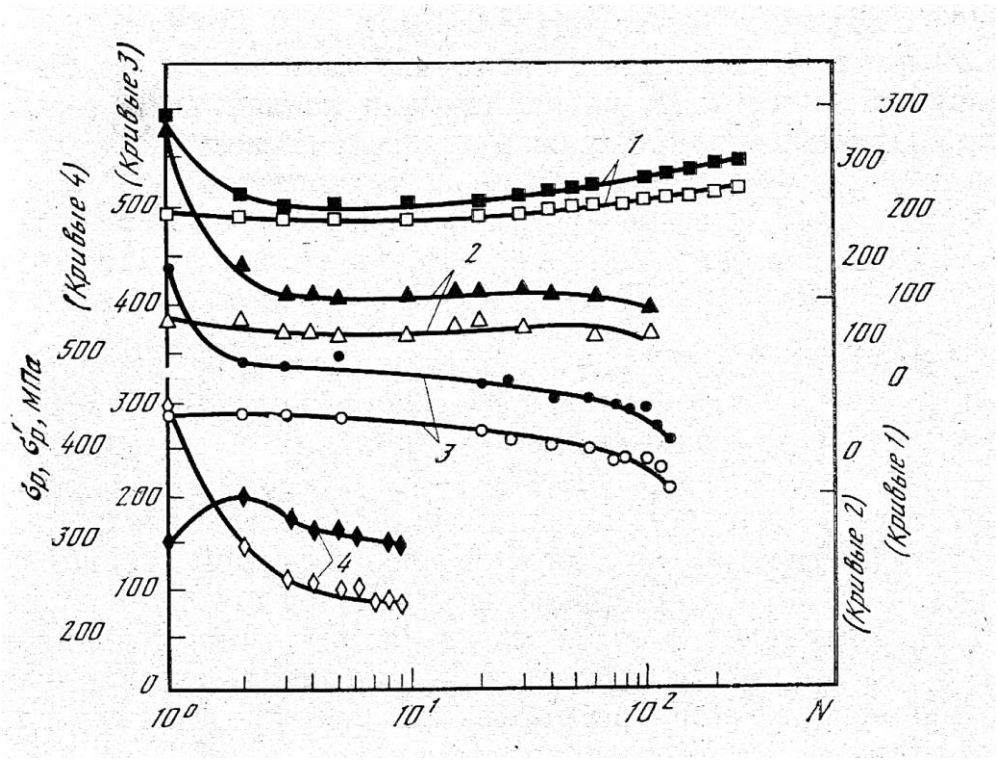


Рис. 7. Изменение пределов пропорциональности конструкционных материалов при циклическом упругопластическом деформировании.

2.2. Деформационно-кинетический критерий усталостного разрушения на стадии образования трещин

Для циклического нагружения на основе представлений о разрушении как предельной работе микронапряжений на пути упругопластической деформации автором получены зависимости, определяющие накопление повреждений с ростом числа циклов нагружения в виде [6-8]:

при жестком нагружении

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

при мягком нагружении

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

В предельном случае, когда наступает разрушение (образование трещины) соответственно

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

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

где δ - ширина петли гистерезиса в полуцикле растяжения, $\Delta\varepsilon$ -односторонне накопленная пластическая деформация в полуцикле растяжения, $e_{yn} = \delta + e_y$, e_y - упругая деформация в полуцикле растяжения, ε - предельная деформация при статическом разрыве образца.

При $e_{уп}$ = const и δ = const (например, для циклически стабильного материала или когда изменением ширины петли гистерезиса в процессе нагружения можно пренебречь) зависимость (3) можно записать в виде:

$$\delta e_{уп} N_p = \varepsilon^2 \quad \text{или} \quad \frac{\delta e_{уп}}{\varepsilon^2} N_p = 1. \qquad (5)$$

Проверка критериев (3) и (4) показала их хорошее соответствие эксперименту во всем диапазоне чисел циклов до разрушения, т.е. как в малоцикловой, так и в многоцикловой области (рис.8).

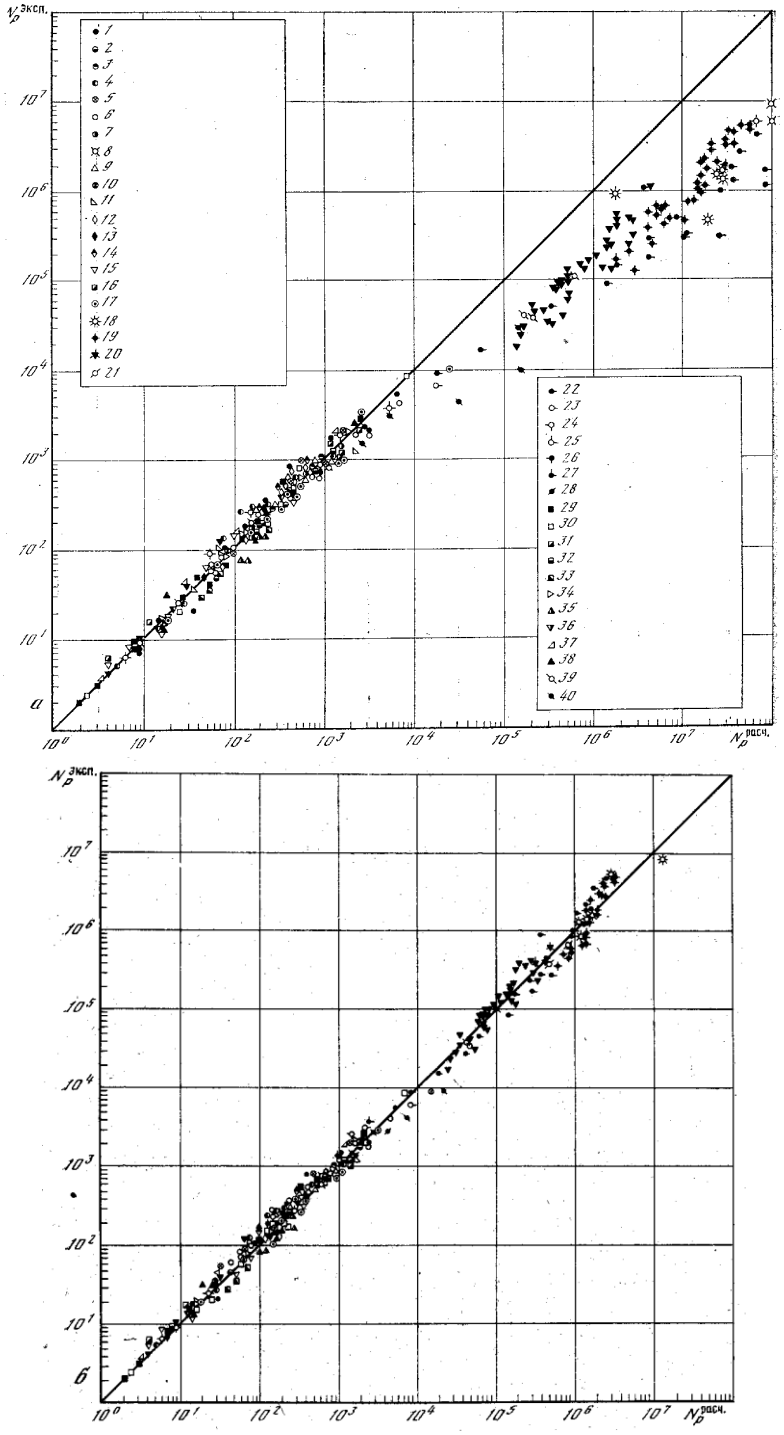


Рис.8. Сопоставление долговечностей, рассчитанных по уравнению (4) с экспериментальными данными (соответственно а и б), полученными при мягком нагружении.

В результате были получены кинетические критерии, позволяющие описать уровни накопленных повреждений на любой стадии циклического нагружения и в предельном случае - момент разрушения, причем как в области малоцикловой, так и многоцикловой усталости, т.е. во всем диапазоне чисел циклов разрушения [7].

Следует отметить, что предельная пластичность материала ε в указанных критериях определяется при статическом разрыве образца в момент, предшествующий потере устойчивости пластической деформации перед образованием шейки, по диаметру d_s (рис. 9)

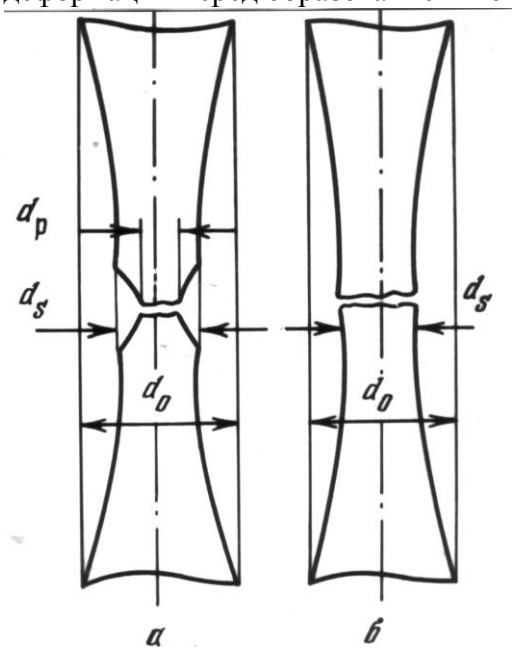


Рис.9. Определение пластичности материала, обеспечивающей несущую способность материала.

2.3. Накопление повреждений при циклическом нагружении на стадиях образования трещин

При циклическом нагружении во всем диапазоне долговечностей (малоцикловая и многоцикловая усталость) роль пластической и упругой деформации может быть оценена в соответствии с зависимостями [8]:

при жестком нагружении

$$\eta = \int_0^N \frac{\delta^2}{\varepsilon^2} dN + \int_0^N \frac{\delta e_y}{\varepsilon^2} dN, \qquad (6)$$

при мягком нагружении

$$\eta = \int_0^N \frac{\delta^2}{\varepsilon^2} dN + \int_0^N \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon} dN + \int_0^N \frac{\delta e_y}{\varepsilon^2} dN, \qquad (7)$$

в котором первый член определяет повреждение от пластической деформации, второй - от статической составляющей (односторонне
накопленной деформации) и третий член определяет уровень накопленного повреждения от действия упругой деформации $e_y = \sigma / E.$

Обработка экспериментальных данных в соответствии с зависимостями (3) и (4) показала, что вклад каждой из составляющих зависит от уровня нагрузки (долговечности): при малом числе циклов до разрушения повреждающей является преимущественно квазистатическая составляющая**,** при больших долговечностях - упругая. Сопоставимый вклад каждой из составляющих, как показано на рис. 10 для стали ТС, наблюдается в области долговечностей 600-800 циклов.

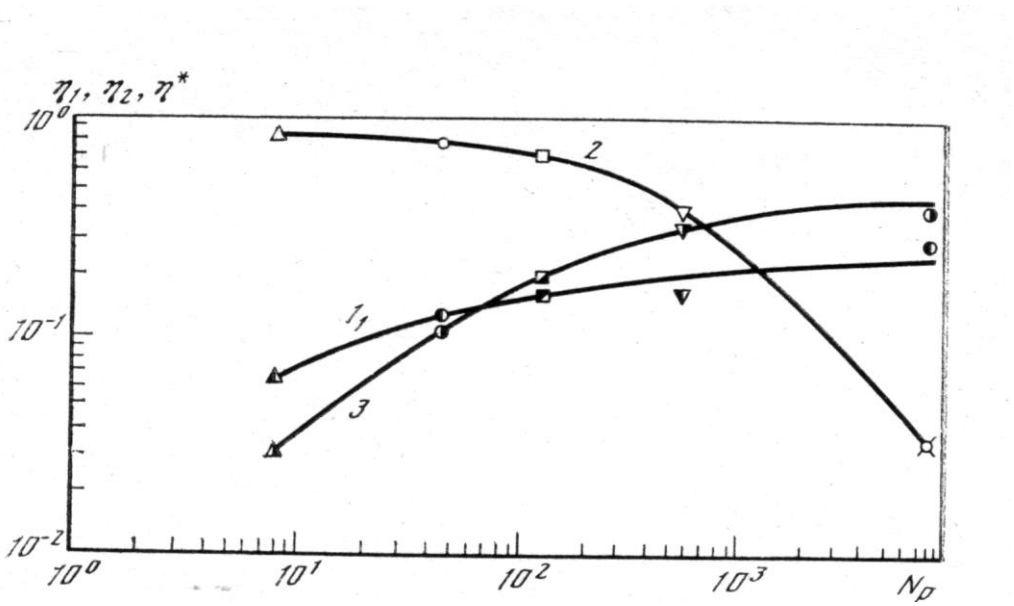


Рис10. Зависимость предельно накопленных повреждений η_1 (1), η_2 (2) и η_3 (3) от долговечности стали ТС.

Критерии (3) и (4) описывают кинетику накопления повреждений, предельным случаем которого является появление макротрещины.

Критерии (1) -(4) являются кинетическими критериями, позволяющими определять повреждения на любой стадии нагружения.

Исследованиями показано, что существует единое правило суммирования повреждений при циклическом нагружении на основе предложенного кинетического критерия. При этом условия нагружения влияют на характеристики сопротивления деформированию, входящие в зависимости (3) и (4), но не изменяют правило (закон) суммирования повреждений в соответствии с этими критериями, в том числе и при программном нагружении (двухчастотное, ступенчатое, с перегрузками, с временными выдержками в полуциклах нагружения и т.д.).

Существование единого критерия усталостного разрушения определяет и существование единой кривой усталости [8,9,10], не зависящей от условий циклического нагружения (рис. 11).

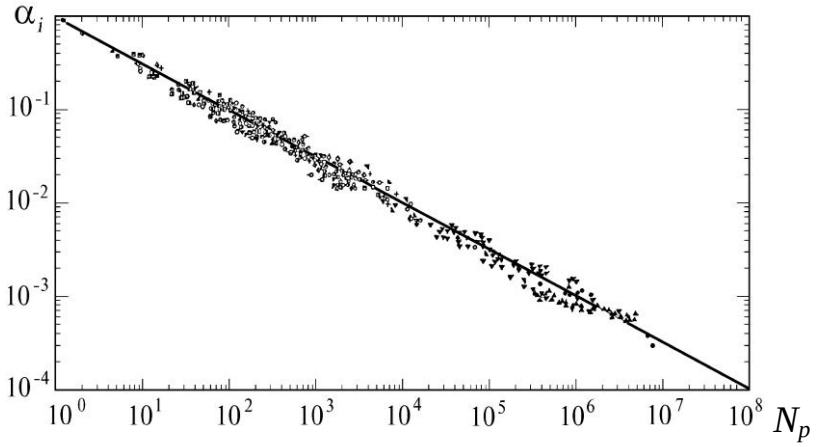


Рис.11. Единая (обобщенная) кривая усталости конструкционных материалов

3. Структурная и деформационная неоднородность конструкционных металлических материалов

Установление закономерностей развития деформаций и накопления повреждений в локальных зонах позволит осуществлять уточненные расчеты долговечности элементов конструкций, назначать обоснованно ресурс изделий и решать вопрос возможности (или невозможности) продления ресурса оборудования, отработавшего назначенный ресурс, а также осуществлять рациональный выбор конструкционного материала при проектировании изделий.

В настоящей работе приводятся результаты исследований по оценке деформационной и структурной неоднородности при циклическом упругопластическом нагружении сталей с разной структурой, выполнен сравнительный анализ результатов деформационной и структурной неоднородности однофазной и двухфазной сталей на основе данных их статистической обработки, а также дана оценка уровней накопленных повреждений в локальных зонах на базе использования деформационно-кинетического критерия, позволяющего определять уровни накопленных повреждений на любой стадии нагружения [1, 8] .

В материалах многофазных характер циклического поведения материала определяется особенностями структурного состояния его отдельных фаз. Это позволяет рассчитать долговечность на стадии рассредоточенного трещинообразования, предшествующей окончательному разрушению элементов конструкций,

Экспериментальное определение развития локальных деформаций является процессом трудоемким, и в связи с этим разработка альтернативных методов определения деформационной неоднородности является важной для решения практических задач.

Задачей исследования является установление возможности определения деформационной неоднородности конструкционных материалов на основе использования характеристик структурной неоднородности. Для многофазного материала, в котором каждая из фаз сопротивляется деформированию по-разному, использование характеристик структурной неоднородности (микротвердости) для описания деформационной требуется экспериментальное определение «слабой» фазы, ответственной в первую очередь за окончательное разрушение материала.. При этом следует иметь в виду, что сопротивление циклическому деформированию отдельных зон и фаз зависит также от условий нагружения: мягкое (с заданной амплитудой нагрузки в цикле) или жесткое (с заданным размахом упругопластической деформации в цикле). Температурные воздействия могут кардинально изменять циклическое поведение материала в целом и его локальных зон и фаз.

Такого рода структурная неоднородность предопределяет условия накопления повреждений в локальных зонах и возникновение в них предельных состояний (образование микротрещин).

3.1. Деформационная неоднородность конструкционных металлических материалов

Исследование особенностей развития деформации в локальных участках рабочей базы образцов исследовалось на однофазной аустенитной стали Х18Н10Т, двухфазной стали ТС, в которой феррит и цементит находятся в связанном состоянии, образуя однородную перлитную структуру, и стали 45, в которой феррит (α-железо) лишь частично связан цементитом, и структура представляет собой смесь перлита и свободного α-железа [2,9,10].

Неоднородности циклической пластической деформации $K_{\mu\delta}$ и односторонне накопленной пластической деформации $K_{\mu\varepsilon}$, определяли в виде

$$K_{\mu\delta} = \delta_i / \delta_{\text{ср}} \quad \text{и} \quad K_{\mu\varepsilon} = \varepsilon_i / \varepsilon_{\text{ср}}, \qquad (8)$$

где δ_i – местная пластическая деформация в цикле; $\delta_{ср} = \delta_k$ - средняя величина ширины петли гистерезиса в цикле, измеренная на всей рабочей базе; ε_i – местная односторонне накопленная деформация в рассматриваемом цикле нагружения; $\varepsilon_{ср} = \varepsilon_k$ - средняя односторонне накопленная деформация на большой базе измерения.

В многофазных сталях или сплавах неоднородность микродеформаций будет локализоваться в наименее прочной фазе и накопление повреждений будет происходить преимущественно в этих зонах и для них должны оцениваться коэффициенты неоднородности деформаций.

Как видно из рис.12, при упругопластическом деформировании в отдельных зонах рабочей базы при средней деформации на базе 2,02% наблюдаются деформации в диапазоне 1,2-3,2%. С увеличением общей деформации местные деформации продолжают расти и при средней деформации 4,23% и 7,38% достигают величины 6% и 9,5% соответственно. Причем увеличение средней деформации сопровождается ростом местной, как правило, в одних и тех же участках. После снятия нагрузки на отдельных участках исходного деформирования последующее нагружение в ту же сторону (растяжение) сопровождается преимущественным деформированием тех же зон (пунктирные кривые на рис.12 получены при предположении, что исходным является нагружение после разгрузки). Однако интенсивность развития деформаций в этих зонах неодинакова, и происходит при этом некоторое выравнивание общих деформаций по всей базе. После разгрузок в процессе дальнейшего нагружения, в том числе и при смене знака нагрузки, средняя деформация по базе поддерживается сравнительно равномерной.

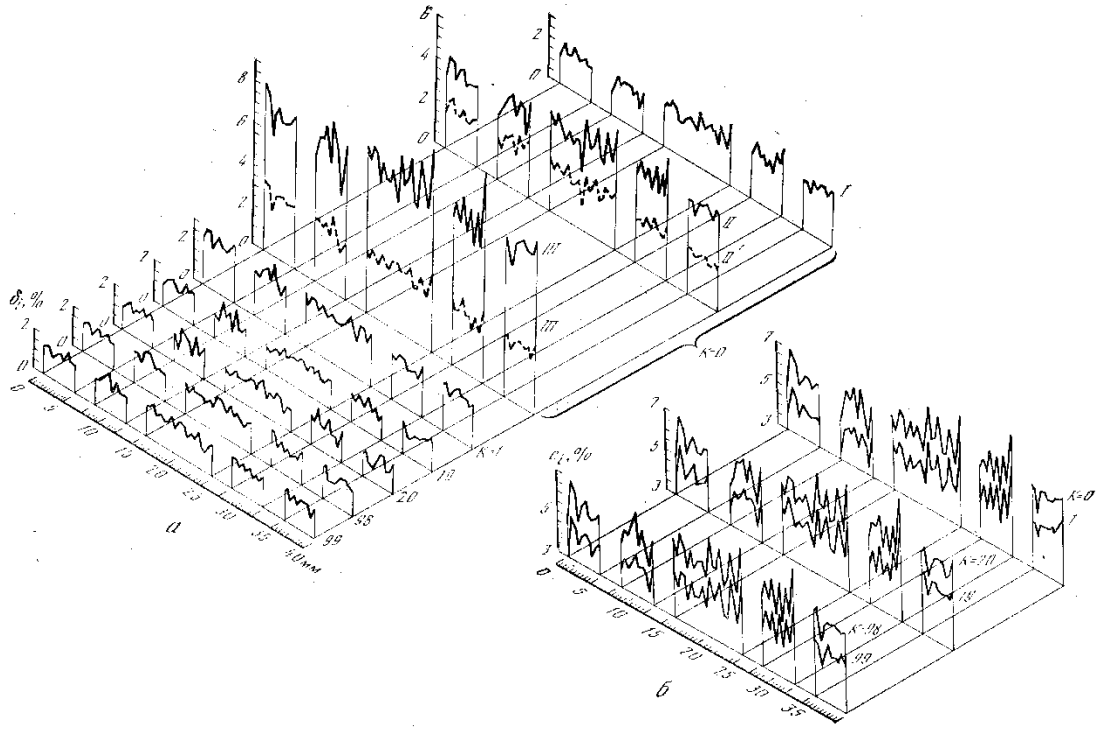


Рис.12. Неоднородность развития циклических (а) и односторонне накопленных (б) пластических деформаций на рабочей базе образца.

Аналогичным образом развиваются и односторонне накапливаются деформации с увеличением количества циклов нагружения продолжают сохраняться участки с повышенным уровнем деформации, накопленной в сторону растяжения.

Как видно из рис.12, наибольшая неоднородность имеет место в первые полуциклы нагружения и при малых степенях деформаций. С увеличением количества полуциклов нагружения и величины деформаций (как циклических, так и односторонне накопленных)

неоднородность уменьшается и на некоторой стадии статического (нулевой полуцикл) и циклического деформирования стабилизируется (как в полуциклах растяжения, так и сжатия). При этом коэффициенты микронеоднородности $K_{\mu\delta}$ и $K_{\mu\varepsilon}$ стремятся к одному и тому же значению, которое при дальнейшем нагружении незначительно изменяется вплоть до появления микротрещин.

Указанные выше кривые даны как для статической (нулевой полуцикл, который был проведен за три этапа со средними деформациями 2,08; 4,303 и 7,52%, после каждой из них производились разгрузка, а затем измерение местных и общей средней деформаций), так и циклических деформаций после следующих полуциклов нагружения: 0, 1, 19, 20, 98 и 99 (рис. 12). .

Статистическое распределение локальных деформаций в стали ТС в исходном состоянии и в первые циклы нагружения представлеы на рис 13.

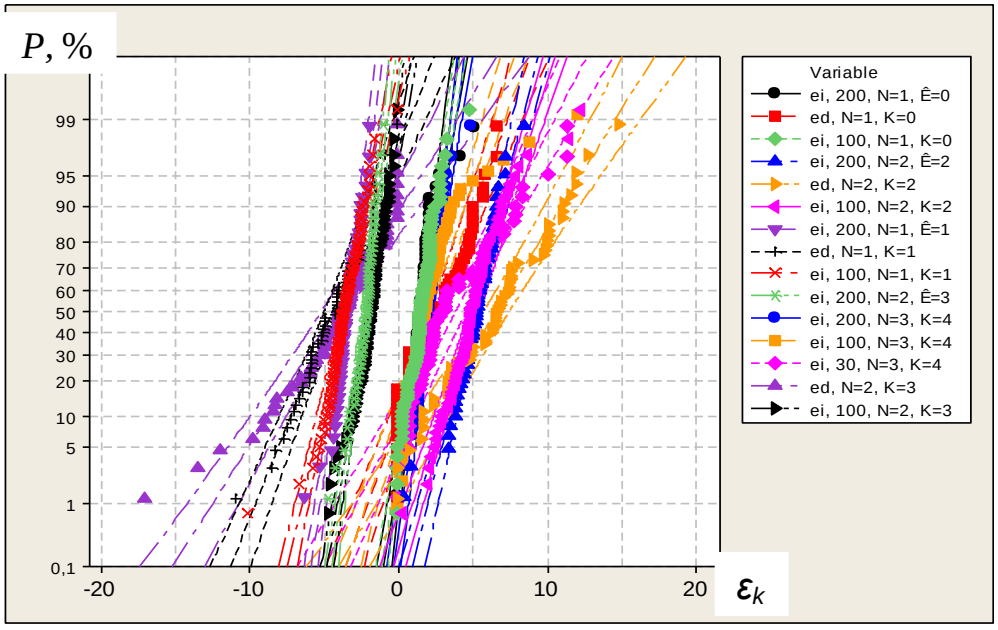


Рис.13. Статистическое распределение деформаций на базах 30 мкм, 100 мкм и 200 мкм стали ТС в полуциклах растяжения и сжатия первого и второго циклов и полуцикле растяжения третьего цикла.

3.2. Структурная неоднородность металлических материалов

Практическое использование местных деформаций в расчетах на прочность представляет определенные трудности, поскольку оно связано с большим числом измерений при экспериментальном определении местных деформаций (на малых базах). В связи с этим желательно иметь более простой и доступный метод определения коэффициентов деформационной неоднородности.

Структурная неоднородность материала, обусловливающая деформационную неоднородность, может быть оценена измерением микротвердости материала в исходном состоянии.

На основе данных статистической обработки проведена оценка неоднородности структуры по вероятностным кривым для распределения значений микротвердости. При этом коэффициенты неоднородности структуры по рассеянию значений микротвердости H_μ определялись в виде

$$K_{H_\mu} = \overline{H}_\mu / H_{\mu i}, \qquad (9)$$

где $H_{\mu i}$ –минимальное значение микротвердости; $\overline{H}_{\mu}$ - среднее значение микротвердости (соответствующее математическому ожиданию H_{μ}).

Проведенная статистическая обработка значений микротвердости и локальной деформации показала, что измеренные значения микротвердости однофазной стали Х18Н10Т подчиняются нормальному закону распределения и коффициенты структурной и деформационной неоднородносити практически совпадают (рис.14).:

В многофазных сталях или сплавах неоднородность микродеформаций будет локализоваться в наименее прочной фазе, и накопление повреждений будет происходить преимущественно в этих зонах, и для них должны оцениваться коэффициенты неоднородности деформаций.

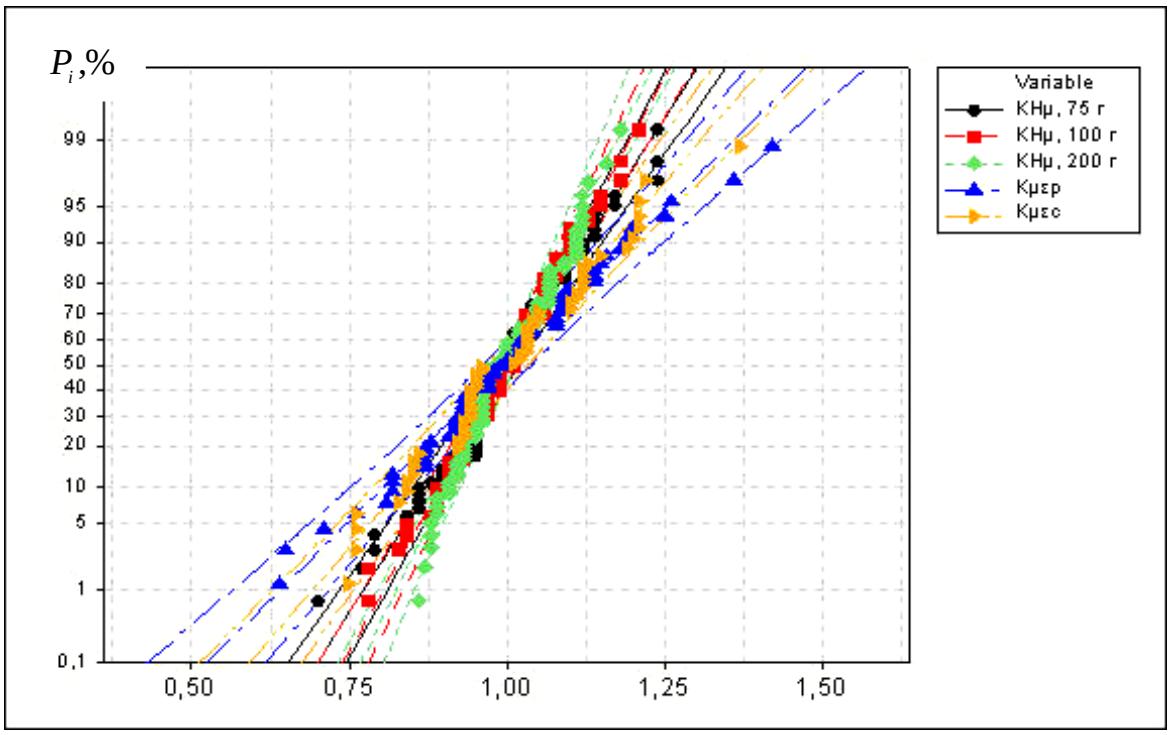


Рис.14. Статистическое распределение коэффициентов неоднородности микротвердости и деформаций в стали Х18Н10Т в исходном состоянии (микротвердость) и после первого цикла нагружения.

3.3.Накопление повреждений в локальных зонах конструкционного материала и рассредоточенное трещинообразование

Деформационная неоднородность приводит к неоднородности накопления повреждений в локальных зонах (рис.15) с образованием в них микротрещин с ростом числа циклов нагружения, развитие которых приводит к рассредоточенному трещинообразованию, а в дальнейшем к образованию магистральной трещины.

Для описания уровня накопленных повреждений η при циклическом упругопластическом деформировании использовался единый деформационно-кинетический критерий (4).

Предельно накопленное повреждение в локальных участках рабочей поверхности образца в соответствии с зависимостью (4) может быть описано в виде:

$$\int_0^{N_p} \frac{(K_{\mu\delta}\delta_k)^2}{\varepsilon^2} dN + \int_0^{N_p} \frac{K_{\mu\varepsilon}\Delta\varepsilon}{\varepsilon} dN + \int_0^{N_p} \frac{K_{\mu e} e_y K_{\mu\delta}\delta_k}{\varepsilon^2} dN = 1, \qquad (10)$$

где $K_{\mu\delta}$ и $K_{\mu\varepsilon}$ - коэффициенты неоднородности циклической и односторонне накопленной деформаций. $K_{\mu e}$ – максимальный коэффициент микронеоднородности упругой деформации; e_y – средняя упругая деформация на рабочей базе образца, определяемая как σ_a / E .

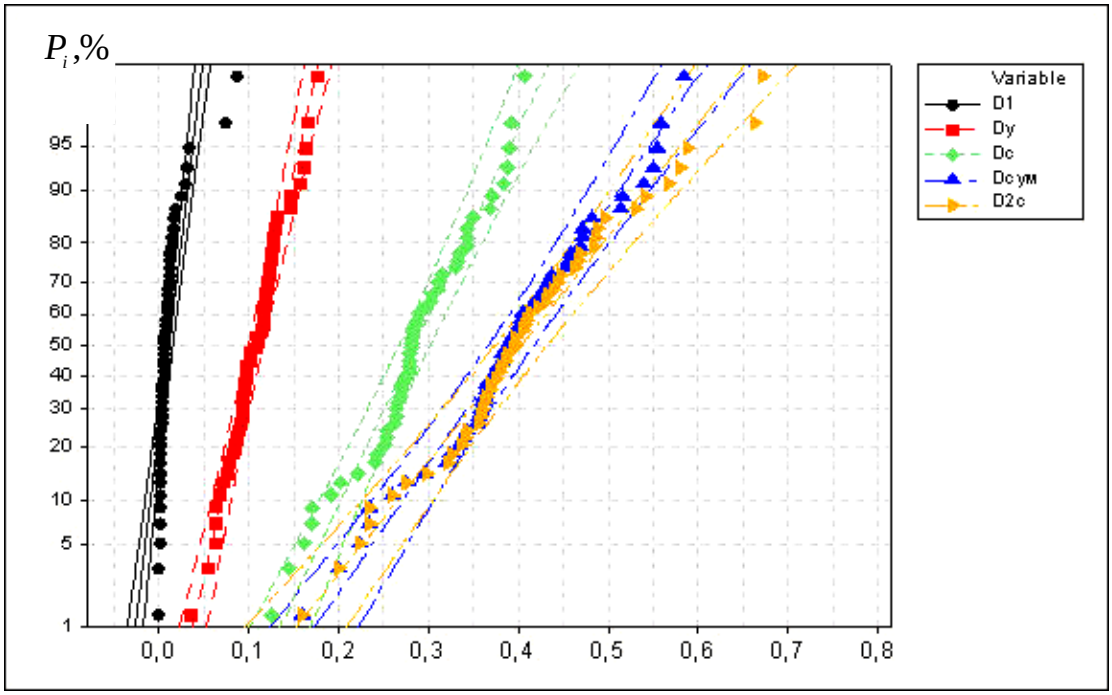


Рис.15. Статистическое распределение повреждений в локальных зонах в стали 45 в первом цикле, усталостного повреждения, статического, суммарного во втором цикле и суммарного повреждения в двух циклах.

3.3. Микроструктурные особенности развития деформаций металлических материалов в широком диапазоне температур

При циклическом нагружении характер развития деформационных процессов зависит от уровня нагрузки и условий проведения испытаний. В условиях комнатных и повышенных температур наблюдается внутризеренное образование следов скольжения, при высоких температурах деформационные процессы сосредотачиваются по границам зерен.

Все виды наблюдавшихся микрорельефов могут быть разделены на две группы. К первой группе отнесены микрорельефы, возникающие в теле зерен, а во вторую группу – развивающиеся на границах зерен и в приграничных участках [3,4] .

Внутризеренные микрорельефы возникают в образцах технического железа и низкоуглеродистых сталей при испытании на усталость во всех интервалах температур.

Микрорельефы, показанные на рис.16, a-d иллюстрируют картину микростроения, наблюдавшуюся на поверхности образцов при испытании в первом температурном интервале, отражают протекание в объеме зерен трансляционного одинарного и множественного скольжения.

При циклическом нагружении смена знака нагрузки способствует протеканию экструзионно-интрузионных процессов (рис.16,f-h), рекристаллизации в деформированных зонах и процессов тонкого скольжения.

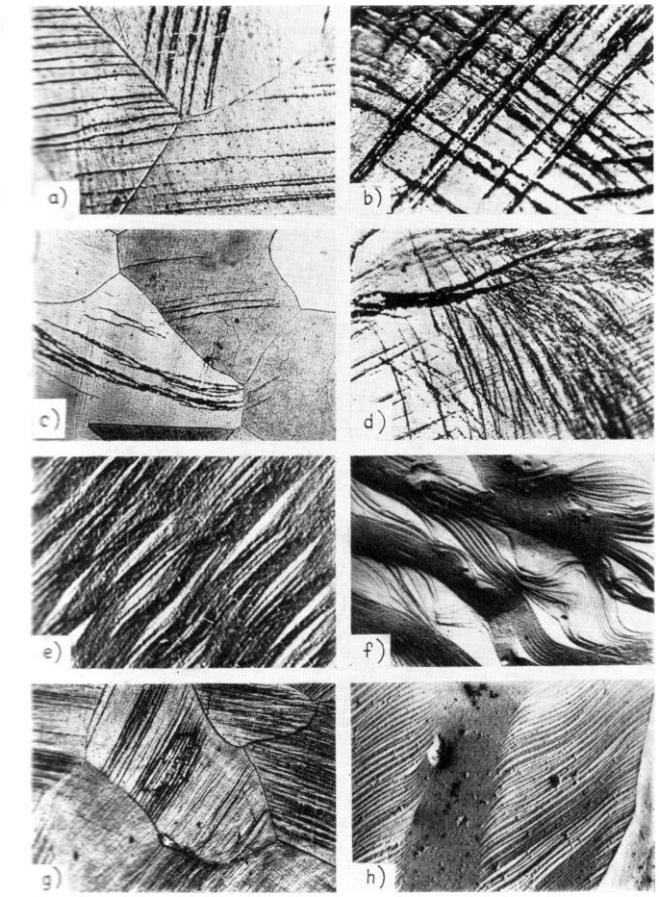


Рис.16. Микрофотографии, полученные с образцов технического железа после испытания на усталость и иллюстрирующие схемы рельефов транскристаллитного разрушения.

На рис.17 представлены типы деформационных микрорельефов, возникающих на поверхности образцов железа в результате циклического нагружения при высоких температурах и преимущественно связанных с развитием процессов деформации по границам зерен и в приграничных участках, а также с развитием собирательной рекристаллизации и полигонизации.

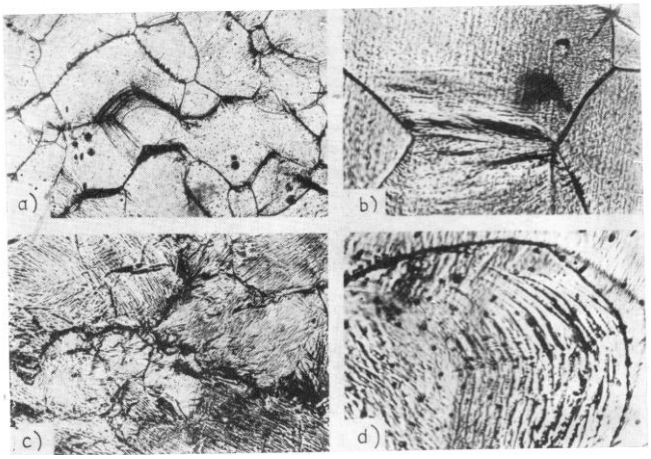


Рис.17. Микрофотографии, полученные с образцов технического железа после испытания на усталость при $\sigma = \pm 14$ кг/мм^2 и иллюстрирующие схемы рельефов второй группы.

Первый тип микрорельефов второй группы (рис.17,a) характеризует взаимное смещение зерен относительно друг друга с образованием трещин по границам. При высоких температурах наблюдали развитие в теле зерен значительных деформаций, связанных с протеканием тонкого скольжения. Это дает основание предполагать, что взаимное смещение зерен является результатом внутризеренной деформации, вызывающей ослабление границ и активно развивающейся в начальный период усталостного разрушения.

Вторым типом микрорельефов (рис.17,b) являются складки, образующиеся в районе «тройных» точек (в зонах сопряжения границ трех зерен). Указанный тип микрорельефа образуется за счет проявления неоднородной пластической деформации в районах тройных точек, возникающей под влиянием концентрации напряжений при различной интенсивности протекания смещения отдельных зерен вследствие их анизотропии.

К третьему типу микрорельефов отнесена полигонизация и фрагментация зерен под действием приложенной к ним переменной нагрузки (рис.17,c). Как правило, величина образующихся в процессе фрагментации субзерен возрастает по мере удаления от границы к средней части зерна. Обычно фрагментацию определяют методами рентгеноструктурного анализа и лишь в некоторых случаях ее удается заметить на полированной поверхности образца при использовании специальных методов травления. Размер субзерен составляет величину около 10^{-4}-10^{-3} см и степень их разориентирования друг относительно друга, а также по отношению к исходной кристаллографической ориентации зерна составляет малые углы порядка нескольких градусов.

Последним, четвертым типом высокотемпературных микрорельефов нашей классификационной схемы принята собирательная рекристаллизация, связанная с миграцией границ зерен (рис.17,d). Воздействие циклической нагрузки на образец значительно активизирует процесс собирательной рекристаллизации. При этом перемещение границ происходит в виде отдельных «скачков» из одного положения в другое и сопровождается интенсивной деформацией объемов материала в зоне расположения мигрирующей границы.

Приведенные микроструктурные микрорельефы не исчерпывают всю полноту развивающихся деформационных процессов на поверхности испытываемых образцов при циклическом нагружении конструкционных металлических материалов.

Таким образом, существование единого критерия разрушения металлических матерниалов во всем диапазоне долговечностей (малоцикловая и многоцикловая усталость) на стадиях образования и развития трещин независимо от типа материала, его структурного состояния (термообработки), вида нагружения (одночастотное, двухчастотное, асимметричное, с временными выдержками, программное) и условий (температура, частота) нагружения формулирует новые подходы к методам расчета на циклическую прочность и правилам выбора материала при конструировании.

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, 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. 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. 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. 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, 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. 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. 2015, №6, с. 31-39.
9. Романов А.Н. Критерии усталостного разрушения. Инженерный журнал «Справочник. Приложение», М., 2007, №6, 35 с.
10. Романов А.Н. Разрушение при малоцикловом нагружении. М.:Наука. 1988, 280 с.