

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ им. Г.В.КАРПЕНКО

на правах рукописи

С К Р Ы П Н И К
ИГОРЬ ДМИТРИЕВИЧ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ЦИКЛИЧЕСКОЙ
ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ СТАЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПОДХОДОВ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ

Специальности: 01.02.04 - механика деформируемого
твердого тела

05.02.01 - материаловедение в машиностроении
/промышленность/

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Львов - 1992

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00816128 (Q)

Робота виконана в Фізико-механічному інституті
ім. Г.В.Карпенко АН України.

НАУЧНІ РУКОВОДИТЕЛІ: - член-кореспондент АН України, доктор
технічних наук, професор О.Н.РОМАНІВ
- доктор технічних наук, старший науковий
сотрудник Г.Н.НИКИФОРЧИН

ОФІЦІАЛЬНІ ОПОНЕНТИ:- доктор технічних наук, старший науковий
сотрудник ЯСНІЯ П.В.
- кандидат технічних наук, старший
науковий сотрудник ЯРЕМА С.Н.

ВЕДУЩЕ ПРІДПРИЯТТЯ - Інститут металургії ім.А.А.Байкова РАН
г.Москва

Захист состоится " 3 " липеня 1992г. в 10⁰⁰ часов
на засіданні спеціалізованого ради Д 016.42.01 в Фізико-
механічному інституті ім. Г.В.Карпенко АН України (290601,
Львів, ГСП, ул. Научна, 5).

С дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Фізико-
механічного інституту ім. Г.В.Карпенко АН України.

Автореферат розослан " 3 " липеня 1992г.

Учений секретарь
спеціалізованого ради

Г.Н.Никифорчин НИКИФОРЧИН Г.Н.

ЛННБ ім. В. Стефаніка
АН УРСР

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

АКТУАЛЬНОСТЬ. Высокотемпературная эксплуатация ряда изделий ответственного назначения зачастую приводит к зарождению и развитию в них усталостных трещин. Повышенная пластичность сталей при таких условиях нагружения обуславливает проблему корректности использования широко распространенных подходов линейной механики разрушения. Вместе с тем, исходя из физических представлений о высокотемпературном росте усталостных трещин (РУТ), более адекватными следует признать деформационные критерии нелинейной механики разрушения. Наиболее распространенным среди них является σ_A -критерий Леснова-Панасика. Однако применительно к РУТ σ_A -критерий еще не получил надлежащего экспериментального обоснования, что обусловлено трудностями методического характера. Другим направлением решения этой проблемы может быть развитие двухпараметрического критерия (ДПК) разрушения, который учитывает в определенных соотношениях вклад сингулярной составляющей тензора напряжений и номинальных напряжений в нетто-сечении. Такой подход используется, как правило, при оценке кратковременной трещиностойкости, а применительно к РУТ находится на стадии становления.

Условия высокотемпературной эксплуатации изделий часто включают воздействие водородсодержащих сред. Показательным примером может служить разрушение труб печей риформинга из жаропрочной хромоникелевой стали НК-40, характерной особенностью которой является деградация ее свойств в процессе эксплуатации.

Цель работы - разработать экспериментальные методики определения характеристик высокотемпературной циклической трещиностойкости (ЦТ) конструкционных материалов, основывающиеся на деформационных критериях разрушения, и с их использованием выявлять основные закономерности влияния температуры испытаний, газообразного водорода, параметров цикла нагружения на сопротивление РУТ в жаропрочной стали.

Основные задачи работы:

1. Разработать экспериментальную методику определения циклического раскрытия вершины трещины, основанную на представлении о параметре σ , как разрыве поля перемещений в вершине трещины.
2. Распространить ДПК на случай усталостного роста трещин в высокопластичных материалах.
3. Исследовать влияние предварительной наработки на характеристики высокотемпературной трещиностойкости стали НК-40.

4. Выявить закономерности влияния температуры испытаний, газообразного водорода и параметров цикла нагружения на кинетику усталостного разрушения стали НК-40.

5. Изучить механизм влияния водорода на РУТ в конструкционных сталях в зависимости от температуры испытаний.

Научная новизна. 1. Разработаны экспериментальные методики определения: а) циклического раскрытия вершины трещины; б) циклической трещиностойкости и продолжительности стадии зарождения усталостной трещины в высокопластичных материалах с применением ДПК.

2. Показано, что обнаруженная инверсия влияния частоты циклов нагружения на высокотемпературную ИТ стали НК-40 обусловлена тем, какой из частотно зависимых факторов является доминирующим: при высоких ΔK - пластичность материала, а при низких - закрытие трещины, ее затупление и физико-химическое воздействие окружающей среды.

3. Установлено, что наработка стали НК-40 в реальных условиях эксплуатации понижает сопротивление росту трещин как на воздухе, так и в водороде.

4. Выявлен различный характер воздействия водорода на РУТ в жаропрочной стали в зависимости как от температуры испытаний, так и от уровня нагрузки, который обусловлен реализацией различных механизмов разрушения и влияния водорода.

Практическая ценность. На основе подходов нелинейной механики разрушения разработан комплекс экспериментальных методик исследования ИТ материалов в условиях высоких температур (до 1000°C) и контролируемого состава газовых сред.

Осуществлена оценка высокотемпературной ИТ жаропрочной стали, используемой для изготовления реакционных труб риформинга, в зависимости от времени наработки, что позволило установить оптимальный диапазон температур эксплуатации, гарантирующий низкую скорость роста трещин и безаварийную работу печей риформинга в период межремонтного пробега. Внедрение результатов работы на Северодонецком ПО "Азот" обеспечило 264,5 тыс. руб. годового экономического эффекта. Долевое участие автора составляет 115 тыс. руб.

Автор защищает:

1. Предложенные экспериментальные методики, основанные на использовании параметра циклического раскрытия вершины трещины и деформационного двухпараметрического критерия разрушения.

2. Вывод о принципиальной возможности использования двухпараметрического критерия разрушения для прогнозирования продолжительности стадии зарождения усталостной трещины.

3. Методические особенности применения двухпараметрического критерия разрушения к высокотемпературному РУТ в конструкционных сталях.

4. Установленные закономерности высокотемпературного РУТ в стали НК-40 в зависимости от степени наработки в условиях эксплуатации, температуры испытаний, типа среды и параметров цикла нагружения.

Апробация работы. Основные результаты работы доложены на I Всесоюзной конференции "Механика разрушения материалов" (Львов, 1987); III Всесоюзном симпозиуме по механике разрушения (Житомир, 1990); XIV конференции молодых ученых ФМИ им. Г.В.Карпенко АН Украины (Львов, 1989).

Публикации. По результатам диссертации опубликовано 10 работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных выводов и приложения, списка литературы из 148 наименований, содержит 129 стр. машинописного текста, 85 рисунков, 3 таблицы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИИ

В качестве модельного материала для апробации разработанных методических подходов, базирующихся на деформационных критериях, использовали электротехнически чистый алюминий (99,5% Al, $\sigma_{0,2} = 52$ МПа, $\sigma_B = 86$ МПа, $\delta = 29\%$). Особенности высокотемпературного РУТ изучали на коррозионно-стойкой стали НК-40, широко применяемой в химической промышленности. Испытывали кольцеобразные образцы с радиальным разрезом, изготовленные непосредственно из реакционных труб печей риформинга Северодонецкого ПО "Азот". Для оценки влияния эксплуатационного старения стали на деградацию ее свойств материал исследовали в исходном состоянии и после наработки в течение 75400 ч.

Влияние электролитического наводораживания на деформационно-прочностные свойства образцов изучали на стали 9ХС после ее закалки и отпуска в диапазоне 65...250°C, что дало возможность провести исследования материала со структурой мартенсита и широким спектром пластических свойств ($\gamma_B = 1...14\%$). Наводораживание образцов проводили в 26%-ном растворе H_2SO_4 при плотности тока 0,2 А/дм² в течение

ние 20 минут.

Исследования высокотемпературной ЦТ материалов в газовых средах проведены на установках УМЭ-10ТМ и УММ-1, оснащенных камерами в герметическом исполнении. Нагрев образцов (до 1000°C) осуществляли пропуская через них электрического тока.

Закрытие трещины (ЗТ) определяли по методу податливости, используя тензометрический датчик перемещений, устанавливаемый при комнатной температуре вблизи вершины трещины, а в случае высокотемпературного РУТ - между берегами расплава кольцеобразного образца.

Микроструктурные особенности процесса разрушения исследовали на металлографическом микроскопе МИМ-7 и растровом электронном микроскопе РЭМ-100. При металлографических исследованиях морфологии трещин использовали послойный анализ образцов. Для выявления σ -фазы использовали реактив Гросбека, а макроструктуры литого сплава - реактив Келлинга. Восстановление поверхностей изломов стали НК-40, окисленных в процессе испытаний при высокой температуре на воздухе, проводили в среде газообразного водорода при температуре 800°C.

ДЕФОРМАЦИОННЫЕ КРИТЕРИИ РАЗРУШЕНИЯ УСТАЛОСТНОГО РОСТА ТРЕЩИН

Распространение существующих экспериментальных методик, основанных на использовании δ_A -критерия Леонова-Панасюка, ограничено в связи с их сложностью и несовершенством. Помимо чисто технических проблем существуют принципиальные вопросы, связанные с обоснованием схемы замера раскрытия вершины трещины. Так, при его представлении в виде расстояния между двумя точками на берегах трещины в окрестности ее вершины неопределенным является месторасположение этих точек.

Предложенная в работе методика определения циклического раскрытия вершины трещины $\Delta\delta$ вытекает непосредственно из модели Леонова-Панасюка, в соответствии с которой параметр δ рассматривается как разрыв поля перемещений в вершине трещины.

Для реализации методики на боковой поверхности призматического образца (5x23x180мм), нагружаемого изгибом, перпендикулярно линии распространения трещины наносили ряды меток. Расстояние между метками составляло 0,1 мм. В процессе циклических испытаний нагружение прекращали, когда вершина трещины достигала линии меток. Для определения $\Delta\delta$ измеряли расстояния между метками, симметрично расположенными по отношению к вершине трещины, при максимальном и ми-

нимальном усилии в цикле. По величине изменения этого расстояния за цикл нагружения $\Delta \gamma$, для каждой базы γ_0 , строили зависимость $\Delta \gamma = f(\gamma_0)$ (рис.1). Экстраполируя ее на ось $\Delta \gamma$, получали искомую величину $\Delta \sigma$. Из-за имеющегося разброса данных построение зависимости $f(\gamma_0)$ и экстраполяцию ее на "нулевую базу" выполняли на ЗВМ.

С использованием предложенной методики исследовали ЦТ алюминия. Установлено, что РУТ однозначно определяется параметром $\Delta \sigma$ в весьма широком диапазоне длин трещин ($l = 2 \dots 16$ мм).

В двойных логарифмических координатах кинетическая диаграмма усталостного разрушения (КДУР) удовлетворительно описывается уравнением прямой. В то же время, представление данных в координатах $v-\Delta K$ или $v-\Delta K_{eff}$ (с учетом ЗТ) не дает инвариантных относительно l зависимостей.

Для оценки РУТ в работе развит ДПК, который учитывает в определенных соотношениях вклады в усталостное разрушение как сингулярной составляющей тензора напряжений в окрестности вершины трещины, так и номинальных напряжений в нетто-сечении: $v=f(\Delta K, \Delta \sigma)$. Для математического представления критерия в качестве исходного использовано выражение, предложенное А.Н.Васютиным, в которое входит коэффициент концентрации деформации по Н.А.Махутову. Дополнительно учитывали эффект ЗТ. В известном подходе для описания усталостного разрушения предлагается использовать параметры статического нагружения, что является спорным. Поэтому указанные зависимости модифицировали, используя параметры циклического нагружения. Отличительная особенность предлагаемого методического подхода состоит также в построении кривых постоянной скорости роста трещины, которые являются аналогами диаграммы разрушения при кратковременном нагружении и задаются в неявном виде:

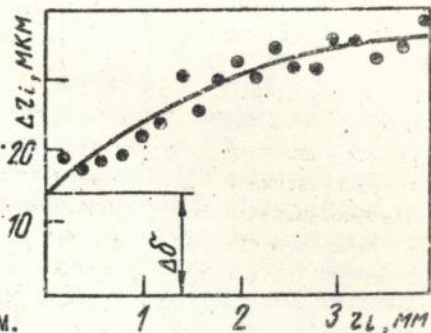


Рис.1. Зависимость перемещения меток в цикле нагружения от базы замера, полученная для алюминия на образце с трещиной $l=16$ мм при $v=1,7 \cdot 10^{-6}$ м/цикл, $\Delta K_{eff} = 4,1$ МПа $\sqrt{м}$.

$$\left[\frac{\Delta\sigma^+}{\Delta\sigma_v^+} \right]^{\frac{1}{n}} + \left[\frac{\Delta\sigma^+}{\sigma_{0,2}} \right]^{\frac{1-n}{n(1+n^*)}} * \left[\frac{\Delta K^+}{\Delta K_v^+} \right]^{\frac{2}{1+n}} = 1, \quad (1)$$

где n - коэффициент деформационного упрочнения ($n^* = n$, если $\Delta\sigma^+ \geq \sigma_{0,2}$ и $n^* = 1$, если $\Delta\sigma^+ < \sigma_{0,2}$). Знак "+" означает, что кривые строятся по размаху нагрузки в положительном полупериоде. ΔK_v^+ , $\Delta\sigma_v^+$ - характеризуют сингулярные и номинальные напряжения, каждое из которых самостоятельно вызывает РУТ с данной скоростью: $v = f(\Delta K_v^+, 0)$ или $v = f(0, \Delta\sigma_v^+)$.

Численно они определяются координатами точек пересечения данной кривой постоянной скорости роста трещины с осями координат (рис. 2.). Указанная кривая строится на основании данных испытаний для постоянной скорости v и подбора параметров ΔK_v^+ , $\Delta\sigma_v^+$ для оптимального описания кривой набора данных.

На основании построенной эталонной кривой постоянной скорости \tilde{v} и данных ΔK^+ , $\Delta\sigma^+$ для других скоростей v можно прогнозировать кривые постоянной скорости и для этих скоростей РУТ, для чего используют выражение:

$$\Delta K_v^+ = \left\{ \left[\frac{\Delta\sigma^+}{\Delta\sigma_v^+} \right]^{\frac{1}{n}} + \left[\frac{\Delta\sigma^+}{\sigma_{0,2}} \right]^{\frac{1-n}{n(1+n^*)}} * \left[\frac{\Delta K^+}{\Delta K_v^+} \right]^{\frac{2}{1+n}} \right\}^{\frac{n+1}{2}} * \Delta K_v^+, \quad (2)$$

и уравнение (1). Совпадение расчетных и экспериментально полученных данных (рис. 2.) подтверждает эффективность предложенного методического подхода.

Таким образом, для прогнозирования РУТ, начиная от условий, соответствующих применимости подходов линейной механики разрушения, и вплоть до полной пластификации сечения с трещиной, необходимо экспериментально построить одну произвольную КДР и одну кривую постоянной скорости для как можно более широкого спектра значений $\Delta K/\Delta\sigma$, соответствующих различным длинам трещин. Как частный случай, возможен прогноз скорости РУТ при соблюдении требований линейной механики разрушения, когда $v = f(\Delta K_v^+, 0)$. (Здесь ΔK_v^+ суммарный эффективный

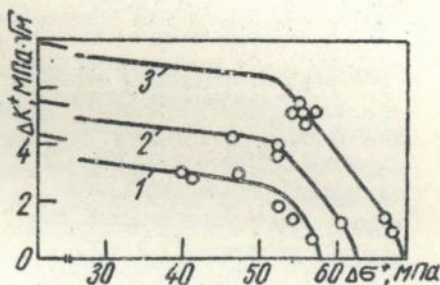


Рис. 2. Кривые постоянной скорости для алюминия: 1- $v = 6 \cdot 10^{-8}$, 2- $v = 1,8 \cdot 10^{-7}$, 1- $v = 1 \cdot 10^{-6}$ м/цикл.

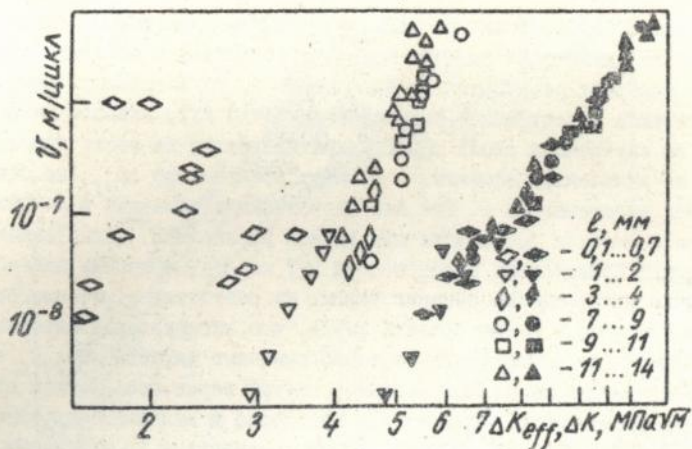


Рис.3. Зависимости v - ΔK_{eff} (светлые символы) и v - ΔK_v (темные символы) для алюминия, полученные на образцах с различной длиной трещины.

размах коэффициента интенсивности напряжений). Это дает возможность описать РУТ единой, не зависящей от l кривой (рис.3.), которую можно считать характеристикой материала.

Противоположный граничный случай, когда $v=f(0, \Delta\sigma)$ означает, что трещина имеет нулевую длину и растет со скоростью v от гладкой поверхности. Такие предпосылки использованы при изучении возможности расчета периода зарождения трещин. В качестве критерия зарождения трещины для алюминия выбрана длина трещины 0,5 мм. Построена расчетная кривая долговечности в координатах $\Delta\sigma_v^+ - N$ (типа кривой Веллера), связывающая размах растягивающих напряжений в полцикле нагрузки с количеством циклов N до зарождения трещины заданной длины от гладкой поверхности. Проведенная на алюминии экспериментальная проверка подтвердила принципиальную возможность применения ДЖК для прогнозирования стадии зарождения трещин в области малоциклового усталости на основе результатов испытаний материала на ЦТ.

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ЦИКЛИЧЕСКАЯ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ

Влияние эксплуатации труб из стали НК-40 в промышленных условиях на ЦТ материала изучали на кольцеобразных образцах с трещина-

ми длиной $l=6...14$ мм при комнатной температуре и постоянном, относительно низком $\Delta K = 8 \text{ МПа}\sqrt{\text{мм}}$. Если для материала в исходном состоянии кинетика разрушения не зависит от l , то деградация материала обусловила существенное повышение скорости РУТ, наиболее интенсивное во внутренних слоях трубы. Закрытие трещин не несет ответственности за выявленные эффекты, поскольку постоянство ΔK_{eff} не обеспечивает неизменности v . Так как не возникает сомнений в реализации условий плоской деформации при данном уровне КИН, единственной причиной приведенных особенностей РУТ следует признать изменение свойств материала по сечению трубы. Из результатов металлографического анализа можно сделать вывод, что эксплуатация материала приводит к перераспределению зернограницных карбидов Me_{23}C_6 с выделением мелкодисперсных карбидов внутри зерен, обеднением приграничных участков по содержанию в них хрома и выделением хрупкой σ -фазы в виде тонких пластинок. Это сказывается на ухудшении стойкости приграничных областей к высокотемпературному воздействию и зарождению здесь трещинообразных дефектов.

Независимо от состояния стали, скорость РУТ с повышением температуры испытаний возрастает. При этом до 870°C ЦТ стали изменяется монотонно. По мере дальнейшего увеличения температуры испытаний до 920°C происходит резкое ускорение РУТ. Использование ДПК к результатам испытаний материала в исходном состоянии дало возможность построить КДПР, которые соответствуют условиям линейной механики разрушения. Характер влияния температуры испытаний при этом не изменился - с ее повышением скорость РУТ возрастает.

Отмечены некоторые особенности КДПР при высокой температуре. Ее первый участок охватывает диапазон скоростей от припороговых до $v \sim 10^{-7}$ м/цикл. Второй участок является достаточно пологим и напоминает кинетическую диаграмму роста трещин при ползучести. В этой связи специфический характер второго участка отражает, очевидно, влияние статического фактора в условиях высокотемпературной усталости. Характерно, что с увеличением частоты нагружения ($f=0,001...10 \text{ Гц}$) скорость РУТ на первом участке возрастает, а на втором - понижается.

При переходе от первого ко второму участку диаграммы исчезает ЭТ. Его проявление увеличивается с уменьшением l , что обусловлено не только интенсификацией пластического течения в окрестности вершины трещины, но также усилением процессов окисления в ее полости. На это указывает более сильная частотная зависимость параметра

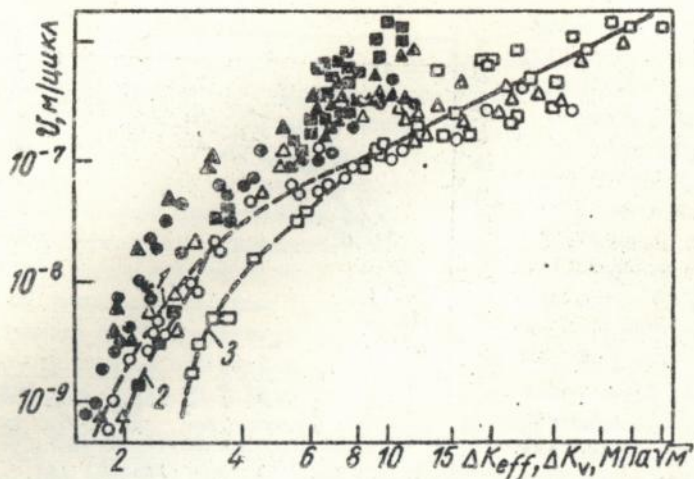


Рис. 4. Зависимости v - ΔK_{eff} (темные символы) и v - ΔK_v (светлые символы) для стали НК-40, испытанной при $T=870^\circ\text{C}$, $R=0,05$ и частоте циклов нагружения $f=10\text{Гц}$ (1- \circ , \bullet); 1Гц (2- Δ , \blacktriangle); $0,03\text{Гц}$ (3- \square , \blacksquare).

ΔK_{th} (закрытой части цикла нагружения, соответствующего пороговому ΔK), в сравнении с пределом текучести.

Независимо от частоты нагружения расчетные данные по скорости РУТ при высоких ΔK практически образуют единую полосу в координатах v - ΔK_y (рис. 4.). Это означает, что при выполнении условий плоской деформации кинетика разрушения была бы частотно-независимой. Насолюдение этих требований обусловлено ползучестью материала в вершине трещины, что учитывает ДПК. Вместе с тем, применение ДПК не дает возможности описать скорость РУТ в припороговой области единой зависимостью. Рассматривая трещину как концентратор напряжений с радиусом ρ , анализировали кривые постоянной скорости при низких ΔK для различных частот и одной скорости РУТ. На основании проведенного анализа можно сделать вывод, что из формирования порогов высокотемпературной ЦТ влияет закрытие трещины, ее затупление и упрочняющее действие поверхностных пленок (тормозящих пластические сдвиги в вершине трещины).

Повышение асимметрии цикла нагружения ($R=-1;0;0,4$) ускоряет высокотемпературный РУТ. Вид кинетических диаграмм не зависит от R ,

однако существенно увеличивается скорость РУТ, при которой наблюдается переход от первого участка диаграммы ко второму. В этом плане увеличение асимметрии адекватно понижению f .

Учет ЗТ приводит к наложению лишь припороговых участков диаграмм $v-\Delta K_{eff}$, построенных для разных R , не влияя на ход высокоамплитудных участков диаграммы, для которых ЗТ не характерно. Вместе с тем, комплексное использование концепций ЗТ и ДЛК позволило построить инвариантную относительно R кинетическую диаграмму усталостного разрушения (рис.5), которую можно считать характеристикой материала для данной температуры испытаний и f .

Таким образом, только при выполнении условий линейной механики разрушения можно ожидать инвариантных относительно R кинетических диаграмм разрушения в эффективных координатах.

РОСТ УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН В УСЛОВИЯХ СОВМЕСТНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ГАЗООБРАЗНОГО ВОДОРОДА И ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР

Повышение температуры испытаний в диапазоне 20...800°C ускоряет РУТ в стали НК-40 независимо от типа среды (воздух, водород, вакуум). Выявлено также, что понижение ЦТ, обусловленное эксплуатационной наработкой стали, свойственно всем исследуемым средам.

Характер и интенсивность влияния водорода на РУТ в стали в исходном состоянии зависит как от температуры испытаний, так и от амплитуды нагружения. Что касается высших ΔK , то для диапазона температур до 400°C характерно ускорение РУТ в сравнении с наблюдаемым на воздухе и в вакууме. При повышении температуры испытаний влияние водорода ослабевает и практически исчезает для диапазона

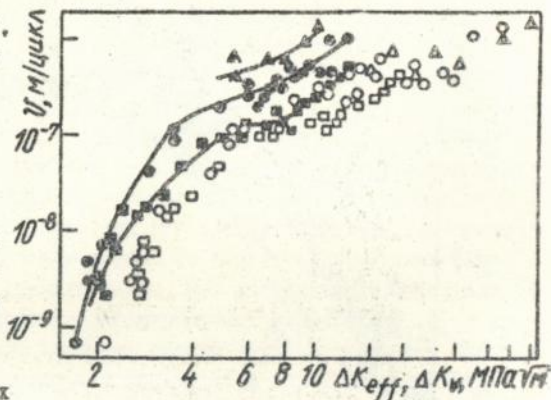


Рис.5. Зависимости $v-\Delta K_{eff}$ (темные символы) и $v-\Delta K_v$ (светлые символы) для стали НК-40, испытанной при $T=570^\circ\text{C}$, $f=1\text{Гц}$ и различной асимметрии цикла $R=1$ (\square, \times); 0 (\circ, \diamond); $0,4$ ($\triangle, \blacktriangle$).

температур 400...800°C.

Для низкоамплитудной области нагружения обнаружили температурную инверсию влияния водорода на ЦТ стали. При испытаниях до 400°C водород повышает, а при более высоких температурах - понижает сопротивление росту трещин (рис.6,а). С повышением температуры испытаний отрицательное влияние водорода ослабевает и при достижении 800°C практически исчезает по отношению к эффективным порогам $\Delta K_{th\ eff}$ (рис.6,б). Однако номинальные пороги ΔK_{th} понижаются в водороде и при столь высокой температуре испытаний. Это обусловлено интенсивным оксидообразованием на воздухе и, соответственно, высоким уровнем ЗТ, не характерным для РУТ в водороде.

С целью изучения механизма упрочняющего влияния водорода в припороговой области нагружения в диапазоне температур до 400°C проведен модельный эксперимент на кручение электролитически наводороженных образцов из стали ЭХС. Такая схема нагружения обеспечивает высокий градиент напряженного состояния образца, подверженного наводороживанию.

Обнаружен различный характер влияния наводороживания на прочностные характеристики стали в зависимости от уровня ее пластичности. Так, при уровне пластичности вплоть до 12% наводороживание понижает, а при более пластичном состоянии стали - повышает условный предел текучести. Указанная инверсия соответствует изменению механизма разрушения в приповерхностных слоях образцов от отрывного к сдвиговому.

Электронномикроскопический анализ цилиндрических поверхностей образцов выявил наличие интенсивных повреждений в результате наводороживания, что, очевидно, и обусловило снижение предела текучести. В то же время упрочнение водородом стали в пластичном состоянии, а также экспериментально зафиксированный рост показателя де-

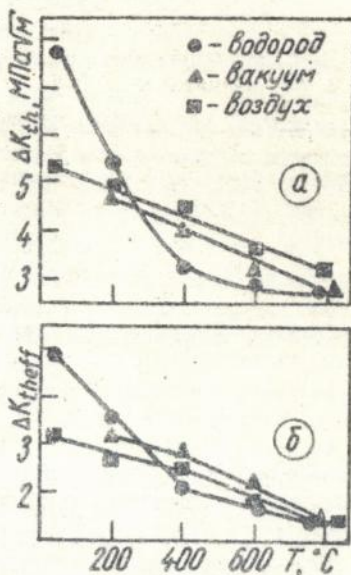


Рис.6. Температурные зависимости номинальных (а) и эффективных (б) порогов ЦТ.

формационного упрочнения для наводороженного слоя можно связать с облегчением процесса инициирования дислокаций.

Рассмотренный механизм воздействия водорода на механические свойства стали удовлетворительно объясняет характер воздействия водорода на ЦТ стали НК-40 в диапазоне температур до 400°C. Так, увеличение под влиянием водорода скорости РУТ в высокоамплитудной области нагружения обусловлено уменьшением сопротивления отрыву. Что же касается порогов ЦТ, то их повышение связано, с одной стороны, с реализацией разрушения по сдвиговому механизму, а с другой - энергетической выгодностью размещения водорода в дефектах, что косвенно содействует размножению дислокаций. При более высоких температурах испытаний ускорение РУТ в водороде обусловлено снижением сопротивления пластической деформации.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Разработана экспериментальная методика определения циклического раскрытия вершины трещины в виде разрыва поля перемещений в ее вершине. Показано, что определенный предложенным способом параметр ΔC , в отличие от параметра ΔK , однозначно определяет скорость РУТ в высокопластичных материалах, независимо от длины трещины.

2. Развита деформационный двухпараметрический критерий разрушения применительно к РУТ в высокопластичных материалах. Разработанная экспериментальная методика позволяет:

а) построить единую кинетическую диаграмму усталостного разрушения для широкого диапазона длин трещин (в том числе коротких), которая удовлетворяет условиям правосторонности использования подходов линейной механики разрушения;

б) прогнозировать продолжительность стадии зарождения трещины в малоцикловой области нагружения.

3. Использование двухпараметрического критерия разрушения при оценке РУТ позволяет учитывать влияние параметров цикла нагружения (частота, асимметрия) в случае, когда они вызывают только изменение интенсивности пластических деформаций в вершине трещины.

4. Обнаруженная инверсия влияния частоты циклов нагружения на высокотемпературную ЦТ стали НК-40 обусловлена тем, какой из частотно зависимых факторов является доминирующим: при высоких ΔK - это пластичность материала, а при низких - закрытие трещины, ее затупление и физико-химическое воздействие окружающей среды.

5. Нарботка стали НК-40 в реальных условиях эксплуатации понижает ее высокотемпературную ЦТ как на воздухе, так и в водороде.

6. Скорость РУТ в стали НК-40 монотонно увеличивается с повышением температуры испытаний до 870°C. Дальнейшее увеличение температуры резко понижает ЦТ стали, что следует учитывать при регламентации температурного режима эксплуатации реакционных труб риформинга.

7. Влияние электролитического наводороживания на характеристики прочности низкоотпущенной стали ЭХС зависит от уровня ее пластичности: при малой пластичности они понижаются в связи с повреждаемостью материала, а при большой - возрастают, что указывает на упрочняющее действие водорода.

8. Характер и интенсивность влияния водорода на РУТ в стали НК-40 зависит как от температуры испытаний, так и от уровня нагрузки. Для порогов трещиностойкости выявлена температурная инверсия влияния водорода: до 400°C уровень ΔK_{th} в водороде возрастает, а при более высоких - понижается. Для высокоамплитудного нагружения это влияние может сказываться только в ускорении роста трещин. Обнаруженные эффекты обусловлены реализацией различных механизмов разрушения и влияния водорода: при низких температурах (до 400°C) и высоких ΔK - понижением сопротивления отрыва; при низких ΔK и температурах - сдвиговым механизмом разрушения и упрочняющим воздействием водорода; при высоких температурах (сверх 400°C) и низких ΔK - сдвиговым механизмом разрушения и снижением под влиянием водорода сопротивления пластической деформации.

ПУБЛИКАЦИИ ПО МАТЕРИАЛАМ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Козак Л.Ю., Рипецкий С.И., Скрипник И.Д. Влияние газособразного водорода на циклическую трещиностойкость конструкционных сталей // В кн.: Механика разрушения материалов: Тез. докл. I Всесоюзной конференции. - Львов, 1987. - С. 202.
2. Застосування критерію розкриття тріщини при дослідженні циклічної тріщиностійкості матеріалів підвищеної пластичності / О.М.Романів, Г.М.Никифорчин, О.З.Студент, І.Д.Скрипник // Фіз.-хим. механіка матеріалів. - 1989. - № 6. - С. 12-18.
3. Скрипник И.Д. Определение циклического раскрытия вершины трещины // Матер. XIV конф. мол. ученых Физ.-мех. ин-та АН УССР. Львов, 29-30 нояб. 1989/ Физ.-мех. ин-т АН УССР, Львов, 1990. - С. 164-170. - Деп. в ВИНИТИ 06.04.90, №1890-В90.

4. Скрипник И.Д., Об инвариантности критерия разрушения электротехнических материалов // Там же, - С. 151-163. - Деп. в ВИНТИ 06.04.90, N1890-В90.
5. Двухпараметрический критерий разрушения для роста вторичных трещин / О.М.Романів, Г.М.Никифорчин, О.З.Студент, І.Д.Скрипник // Физ.-хим. механика материалов. - 1990. - N 1. - С. 46-54.
6. Високотемпературна тріщиностійкість литої сталі труб печей риформіну / Г.М.Никифорчин, О.З.Студент, І.Д.Скрипник, и др. // Там же, - N 2. - С. 68-74.
7. Скрипник И.Д. Об оценке жесткости напряженного состояния в окрестности вершины трещины. - Львов, 1990. - 7.С. - Деп. в ВИНТИ 20.04.90, N2119-В90.
8. Аналіз високотемпературного росту вторичних тріщин в корозійно-стійкій сталі з позицій двохпараметричного критерію руйнування / О.М.Романів, Г.М.Никифорчин, О.З.Студент, І.Д.Скрипник // Физ.-хим. механика материалов. - 1990. - N 5. - С. 9-19.
9. Применение двухпараметрического критерия для описания усталостного роста трещин / О.М.Романів, Г.М.Никифорчин, А.З.Студент, І.Д.Скрипник // В кн.: Трещиностойкость материалов и элементов конструкций: Тез. докл. III Всесоюзного симпозиума по механике разрушения. - Житомир, 1990. - Ч.І. - С. 47.
10. Студент А.З., Скрипник И.Д., Костенко Г.Е. Рост усталостных трещин в стали НК-40 при высоких температурах // Там же, - Ч.ІІ. - С. 82-83.

у Скрипник

Подписано к печ. 28.05.92. Формат 60x84/16. Печать офсет. Бумага офсет. Усл.п.л. 0,93. Усл.кр.-отт.0,93 Уч.-изд.л. 1,0 Тираж 150 экз. Зак. 2756

Областная книжная типография, 230000, Львов, ул. Стефаника, 11