

Моделирование радиационного повреждения материалов с точки зрения переноса результатов ионного облучения на нейтронное

Докладчик: Борис Захарович Марголин

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»



Homo ·
Science
РОСАТОМ

ГОД НАУКИ И ТЕХНОЛОГИЙ В РОССИИ



Охрупчивание ОЦК-металлов (включая феррито-мартенситные и корпусные стали) по упрочняющему механизму

Характеристика, контролирующая охрупчивание:

увеличение предела текучести под облучением (радиационное упрочнение) $\Delta\sigma_{0.2}(D)$, где D - повреждающая доза облучения

Возможность прогнозирования сопротивления хрупкому разрушению (пластичности и трещиностойкости):

Разработаны критерий и вероятностная модель хрупкого разрушения, позволяющие прогнозировать пластичность и трещиностойкость ОЦК-металлов по данным $\Delta\sigma_{0.2}(D)$

Возможность определения контролирующего параметра по результатам исследований после ионного облучения:

легко реализуема - существует прямая корреляция между радиационным упрочнением $\Delta\sigma_{0.2}$ и изменением твердости ΔH_v

Задачи моделирования:

определение режима ионного облучения (температура, скорость облучения, сочетание тяжелых и легких ионов) эквивалентного нейтронному при одной и той же повреждающей дозе по критерию идентичности $\Delta\sigma_{0.2}$



Homo
Science
РОСАТОМ

Охрупчивание ОЦК-металлов (включая феррито-мартенситные и корпусные стали) по неупрочняющему механизму



НАУКА
И ИННОВАЦИИ
РОСАТОМ

Характеристика, контролирующая охрупчивание:

прочность границ зерен и/или внутризеренных границ матрица-включение $\sigma_d(D)$, зависящая от концентрации примесных элементов на границах (фосфор, сурьма, мышьяк и др.)

Возможность прогнозирования сопротивления хрупкому разрушению (пластичности и трещиностойкости):

Разработаны критерий и вероятностная модель хрупкого разрушения, позволяющие прогнозировать пластичность и трещиностойкость ОЦК-металлов по данным σ_d . В настоящее время параметр σ_d определяется из специальных механических испытаний металла после нейтронного облучения

Возможность определения контролирующего параметра по результатам исследований после ионного облучения:

трудно реализуема - отсутствуют данные о концентрации примесных элементов на границах с величиной σ_d

Задачи моделирования:

- определение режима ионного облучения (температура, скорость облучения, сочетание тяжелых и легких ионов) эквивалентного нейтронному при одной и той же повреждающей дозе с точки зрения идентичности концентрации примесных элементов на границах ;
- определение связи между степенью концентрации примесных элементов на границах (межзеренных и границах матрица-включение) и величиной σ_d



Охрупчивание аустенитных сталей при отсутствии распухания



Характеристики, контролирующие охрупчивание:

- радиационное упрочнение $\Delta\sigma_{0.2}(D)$;
- прочность внутризеренных границ матрица-включение $\sigma_d(D)$;
- деформационное упрочнение.

Возможность прогнозирования вязкого разрушения (пластичности и трещиностойкости):

Разработаны критерий и поровая модель вязкого разрушения, позволяющие прогнозировать пластичность и трещиностойкость аустенитных сталей под облучением.

В настоящее время параметр σ_d определяется из специальных механических испытаний металла после нейтронного облучения

Установлена эмпирическая связь между деформационным упрочнением и $\Delta\sigma_{0.2}(D)$.

Возможность определения контролирующих параметров по результатам исследований после ионного облучения:

трудно реализуема - отсутствуют данные о концентрации примесных элементов на границах с величиной σ_d , а также способы определения деформационного упрочнения в облученном ионами слое

Задачи моделирования:

определение σ_d по результатам ионного облучения (аналогично задачам моделирования охрупчивания ОЦК-металлов по неупрочняющему механизму);



Охрупчивание аустенитных сталей в зависимости от радиационного распухания

Характеристики, контролирующие охрупчивание:

- величина радиационного распухания Sw ;
- размер зоны процесса, зависящий от диаметра вакансионных пор и расстояния между ними (зона процесса – область, в которой реализуется элементарный акт разрушения).

Возможность прогнозирования вязкого разрушения (пластичности и трещиностойкости):

Разработаны критерий и поровая модель вязкого разрушения, позволяющие учитывать влияние распухания на пластичность и трещиностойкость облученного материала при снижении этих параметров от дозы до насыщения.

Возможность определения контролирующих параметров по результатам исследований после ионного облучения:

реализуема - микроскопический анализ после ионного облучения позволяет определить необходимые параметры распухания (диаметр вакансионных пор и расстояние между ними).

Задачи моделирования:

определение режима ионного облучения (температура, скорость облучения, сочетание тяжелых и легких ионов) эквивалентного нейтронному при одной и той же повреждающей дозе с точки зрения идентичности величины распухания и среднего размера пор (последний параметр позволяет установить среднее расстояние между порами).



Homo
Science
РОСАТОМ

Радиационная ползучесть



НАУКА
И ИННОВАЦИИ
РОСАТОМ

Характеристики, контролирующие ползучесть:

модуль ползучести B в уравнении ползучести:

$$\dot{\epsilon} \sim B \cdot \frac{dD}{dt} \sigma$$

Возможность прогнозирования:

Существуют модели ползучести, позволяющие прогнозировать скорость ползучести материала при одновременном механическом воздействии и нейтронном облучении в более сложном виде, чем указано выше

Возможность определения контролирующих параметров по результатам исследований после ионного облучения:

реализуема – возможно измерение деформирования нагруженного образца малой толщины при одновременном облучении ионами «насквозь»

Задачи моделирования:

определение режима ионного облучения (потока ионов He) эквивалентного нейтронному при одной и той же температуре по критериям равенства модуля ползучести при варьировании скорости набора повреждающей дозы ионного облучения.



Homo
Science
POCATOM

Сопротивление коррозионному растрескиванию (КР)



НАУКА
И ИННОВАЦИИ
POCATOM

Характеристики, контролирующие КР для заданной среды:

- радиационное упрочнение $\Delta\sigma_{0.2}(D)$;
- прочность границ зерен $\sigma_d(D)$, зависящая от радиационно-индуцированных сегрегаций и концентрации He и H по границам;
- сопротивление ползучести.

Возможность прогнозирования КР:

Разработана модель, в которой контролирующие параметры определяются из различных механических испытаний (в том числе и автоклавных) металла, облученного в реакторах.

Возможность определения контролирующих параметров по результатам исследований после ионного облучения:

нереализуема - ввиду сложности определения контролирующих параметров, но, в то же время, **возможно** прямое определение сопротивления коррозионному растрескиванию при автоклавных испытаниях образцов после ионного облучения.

Задачи моделирования:

Не требуются



Homo
Science
POCATOM

Длительная прочность материалов под облучением



НАУКА
И ИННОВАЦИИ
POCATOM

Характеристики, контролирующие длительную прочность:

- радиационное упрочнение $\Delta\sigma_{0.2}(D)$;
- сопротивление радиационной ползучести;
- деформационное упрочнение;
- зернограничная диффузия;
- параметр, контролирующий скорость зарождения зернограничных пор.

Возможность прогнозирования КР:

Разработана модель, в которой контролирующие параметры определяются из различных специальных постреакторных и внутриреакторных механических испытаний.

Возможность определения контролирующих параметров по результатам исследований после ионного облучения:

нереализуема - ввиду сложности определения контролирующих параметров

Задачи моделирования:

По нашему мнению данный механизм разрушения не может быть смоделирован при ионном облучении, поскольку минимальная длительность облучения – не менее 1000 ч



Высокотемпературное радиационное охрупчивание (ВТРО)



Характеристики, контролирующие охрупчивание:

эффективная прочность границ зерен S_c^{IG} как функция температуры испытаний и концентрации He на границах

Возможность прогнозирования ВТРО (пластичности и трещиностойкости):

Разработаны критерий и модель разрушения при ВТРО, позволяющие прогнозировать пластичность и трещиностокость при разрушении по указанному механизму при известной величине S_c^{IG} .

Возможность определения контролирующих параметров по результатам исследований после ионного облучения:

нереализуема - ввиду сложности определения контролирующего параметра

Задачи моделирования:

определение функциональной зависимости S_c^{IG} от температуры испытаний и концентрации He на границах зерен или, хотя бы, вид указанной зависимости при постоянной скорости накопления He



Локальный критерий хрупкого разрушения в детерминистической постановке

Условие зарождения
микротрещины



$$\sigma_{nuc} \geq \sigma_d$$

$$\sigma_1 \geq S_c(\varepsilon)$$

Условие распространения микротрещины

$$\sigma_{nuc} = \sigma_1 + m_{T\varepsilon} \cdot \sigma_{eff} \quad \sigma_{eff} = \sigma_{eq} - \sigma_Y$$

$$m_{T\varepsilon} = m_T(T) \cdot m_\varepsilon(\varepsilon),$$

$$m_\varepsilon(\varepsilon) = S_0 / S_c(\varepsilon), \quad \varepsilon = \int d\varepsilon_{eq}^p$$

$$m_T(T) = m_0 \sigma_{Ys}(T)$$

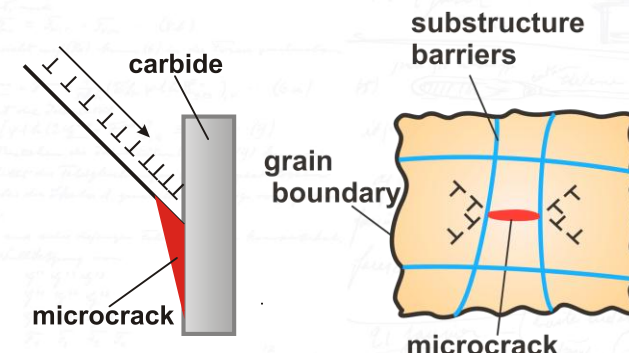
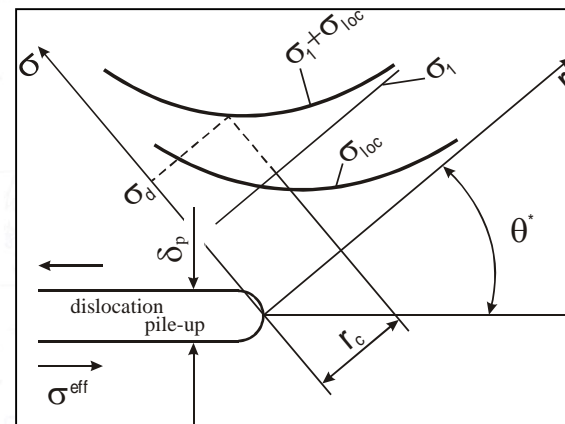
Таким образом, σ_{nuc} функция σ_1 , ε_p и T

σ_{eq} — интенсивность напряжений,

$d\varepsilon_{eq}^p$ — приращение эквивалентной
пластической деформации

C_1 , C_2 , A , m_0 — константы материала,

σ_{Ys} — температурно-зависимая
компонента предела текучести.



Основные параметры

σ_d — критические напряжения зарождения микротрещин
(определяются прочностью карбидов или
прочностью связи карбид-матрица)

S_c — критические напряжения распространения
микротрещин

$$S_c(\varepsilon) = [C_1 + C_2 \exp(-A\varepsilon)]^{-1/2}$$



Обстоятельства и условия зарождения микротрещин способных привести к хрупкому разрушению

1. Микротрещина должна быть «новорожденная», т.е. только что зародившаяся.
Если «новорожденная» микротрещина сразу не развивается, то она притупляется и превращается в пору за счет релаксационных процессов в её вершине.
2. Микротрещина должна быть ориентирована таким образом, чтобы

$$\frac{\sigma_{\max}}{\tau_{\max}} > \frac{\sigma_{\text{т.п.}}}{\tau_{\text{т.п.}}} \quad \rightarrow \quad \begin{aligned} \sigma_{\max} &= \sigma_{\text{т.п.}} - \text{теоретическая прочность на отрыв} \\ \tau_{\max} &< \tau_{\text{т.п.}} - \text{теоретическая прочность на сдвиг} \end{aligned}$$

3. Скорость зарождения микротрещины должна намного превышать скорость деформации материала

$$\frac{1}{l_0} \frac{dl}{dt} \gg \frac{d\varepsilon}{dt} \quad l_0 - \text{длина зародышевой микротрещины}$$

При $\frac{1}{l_0} \frac{dl}{dt} \cong \frac{d\varepsilon}{dt}$

происходит релаксация напряжений у вершины растущей микротрещины и при достижении Гриффитской длины эта микротрещина притупится и не сможет привести к хрупкому разрушению.



Homo
Science
РОСАТОМ

Применение модели “Prometey”.

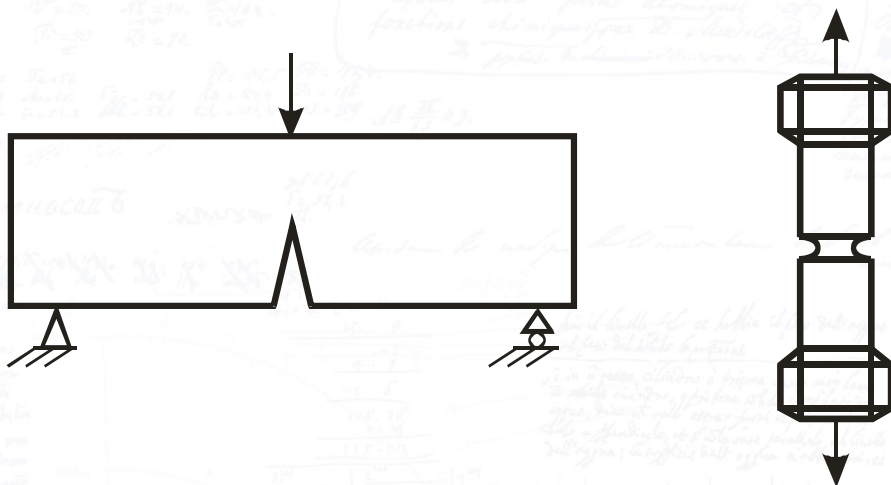
Прогноз $K_{JC}(T)$ для материала с различной степенью охрупчивания

Для калибровки параметров необходимо испытать

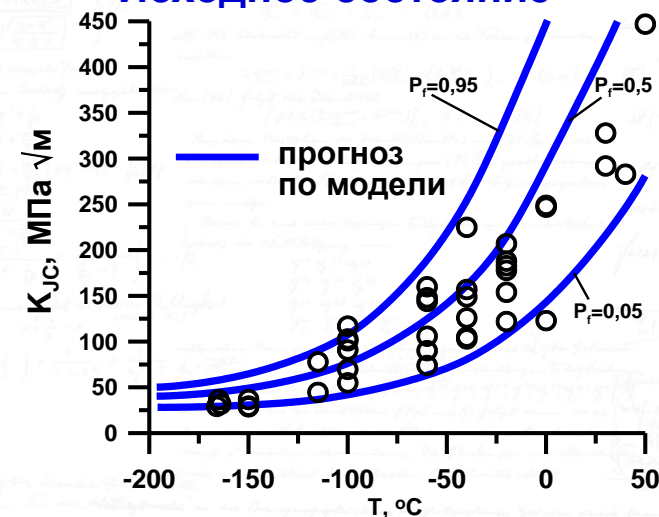
- 1) Малоразмерные гладкие цилиндрические образцы при различных температурах



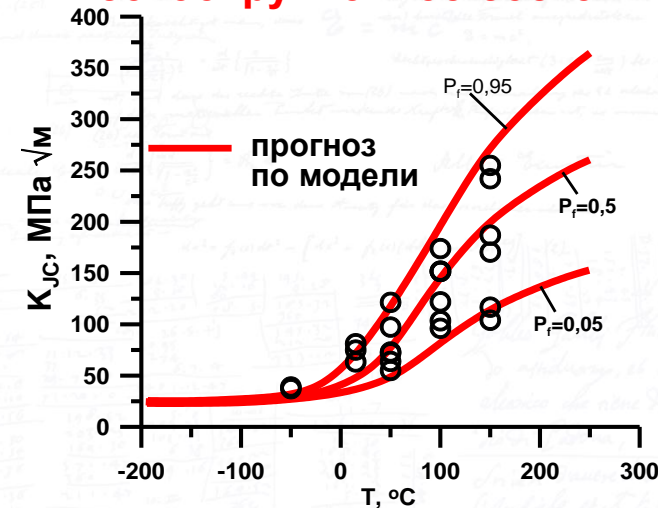
- 2) Малоразмерные образцы с трещиной или с круговым надрезом при одной температуре



Исходное состояние

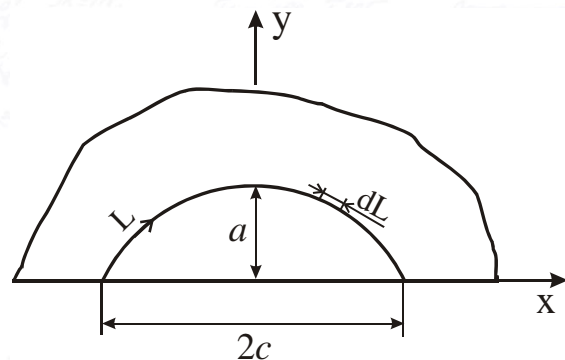


Высокоохрупченное состояние





Условие хрупкой прочности при неизотермическом немонотонном нагружении (в частности, при термошоке). Основные формулировки



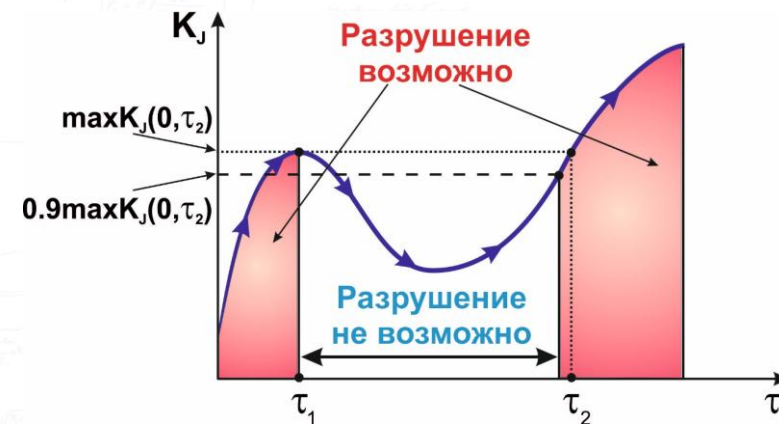
$$\frac{1}{\bar{B}} \int_0^B Z dL < 1$$

$Z = \max\{\alpha\},$ для временного интервала от 0 до t

$$\alpha = \left(\frac{K_J(L, t) - K_{\min}}{\bar{K}_{JC}(L, t) - K_{\min}} \right)^4$$

Без учета влияния тепловой опрессовки

Для каждого момента времени участки фронта трещины, для которых $K_J < 0$, исключаются из интегрирования



\bar{K}_{IC} - трещиностойкость образца эталонной толщины \bar{B} при $P_f = 0.05$

\bar{B} – эталонная толщина (длина фронта)

B – длина фронта трещины

С учетом влияния тепловой опрессовки

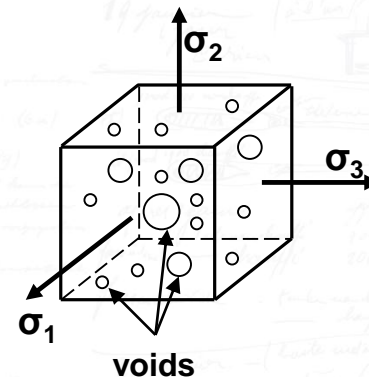
Для каждого момента времени участки фронта трещины, для которых $K_J < 0$ или $K_J < 0.9 K_{J_{\max}}$, (независимо от условия $K_J > 0$ или $K_J < 0$) исключаются из интегрирования



Модель вязкого разрушения. Основные положения



1. Модель вязкого разрушения базируется на рассмотрении зарождения, роста и объединения пор
2. Рассматривается развитие двух популяций пор: вакансионных пор, обуславливающих распухание, и пор, зарождающихся в процессе деформирования материала
3. В качестве критерия разрушения используется критерий пластического коллапса, т.е. разрушение происходит в момент неустойчивого развития пор



$$\left. \frac{dF_{eq}}{d\varepsilon_{eq}^p} \right|_{\frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}} = \text{const}} = 0$$

$$F_{eq} = \sigma_{eq}(\varepsilon_{eq}^p) \cdot (1 - (A_v)_\Sigma)$$

где ε_{eq}^p – пластическая деформация, σ_{eq} – интенсивность напряжений, $(A_v)_\Sigma$ – общая относительная площадь пор

4. Зарождение пор, возникающих в процессе деформирования материала, контролируется напряжением зарождения σ_{nuc} :

$$\frac{d\rho_v^{def}}{d\sigma_d} = \frac{\rho_v^{max} - \rho_v^{def}}{\sigma_d} \quad \Rightarrow \quad \rho_v^{def} = \rho_v^{max} \left[1 - \exp\left(-\frac{\sigma_{nuc} - \sigma_{nuc}^{th}}{\sigma_d}\right) \right]; \quad \sigma_{nuc} = \sigma_1 + m_{T\varepsilon}(\sigma_{eq} - \sigma_Y), \quad \sigma_d = \sigma_d^0 \cdot \exp\left(-\frac{D}{D_0}\right),$$

где σ_1 – максимальные главные напряжения; σ_{eq} – эквивалентные напряжения; $m_{T\varepsilon}$ – численный параметр, σ_d – прочность карбида или межфазных границ; σ_{nuc}^{th} – напряжение, ниже которого зарождение пор не происходит

5. Рост поры контролируется пластической деформацией и описывается уравнением Хуанга, модифицированным для учёта взаимодействия

$$\frac{dV_{void}}{V_{void}} = 3 \cdot \alpha \cdot \frac{1}{1-f} \cdot d\varepsilon^p$$

$$\alpha = 0,427 \cdot \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}} \right)^k \cdot \exp\left(\frac{3}{2} \cdot \frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}} \right)$$

где f – пористость материала:

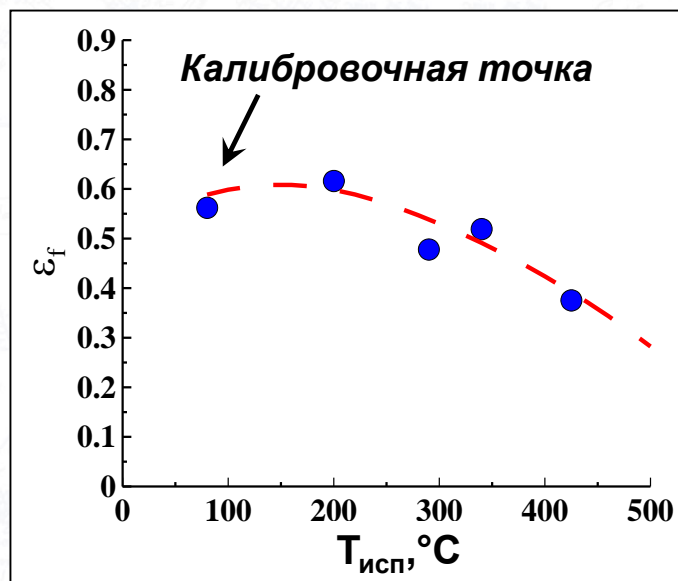
$$f = \frac{V_\Sigma}{V + V_\Sigma}$$



Пример прогноза пластичности облученной аустенитной стали по модели вязкого разрушения

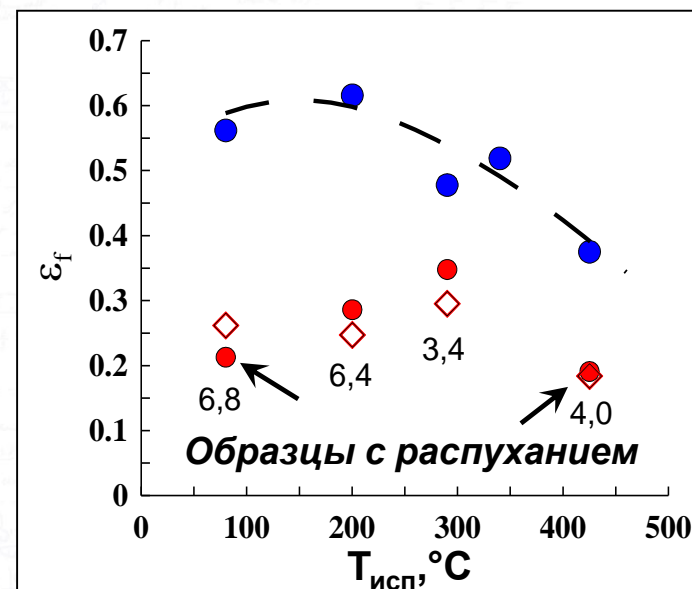
Материал: металл шва стали 08X18H10T, облученный до дозы 46 - 49 сна при $T_{обл}=330-340^{\circ}\text{C}$ (без распухания) и $T_{обл}=400-450^{\circ}\text{C}$ (с распуханием)

Прогнозирование критической деформации материала без распухания



- - экспериментальные данные
- - - - - расчетные значения

Прогнозирование критической деформации материала с распуханием (значение распухания указано под точками)



- , ● - экспериментальные данные
- - -, ◇ - расчетные значения



Homo
Science
РОСАТОМ

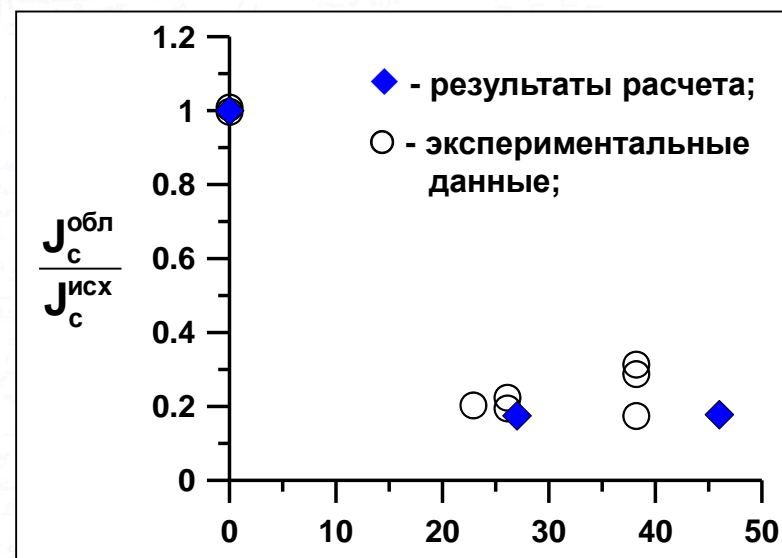
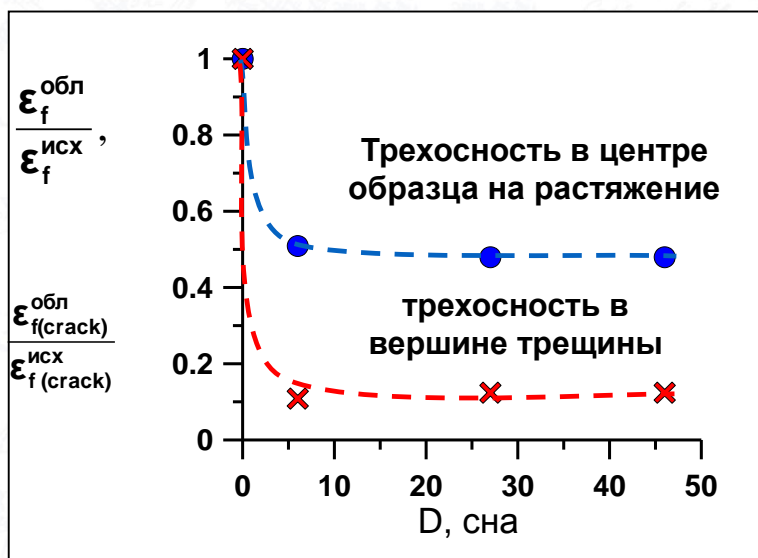
Влияние трехосности напряженного состояния на снижение критической деформации под облучением. Прогнозирование трещиностойкости материала



Материал: металл шва стали 08X18H10T, облученный в диапазоне доз 0-46 сна при температуре облучения $T_{irr}=330-340^{\circ}\text{C}$.

Рассматриваются два варианта трехосности напряженного состояния

- 1) трехосность напряженного состояния в центральной точке шейки образца на растяжение согласно уравнению Бриджмена;
- 2) трехосность напряженного состояния для точки у вершины трещины на линии ее продолжения



- - расчетные значения для цилиндрических образцов на растяжение
- ✕ - расчетные значения для материала у вершины трещины

$$\frac{J_c^{obl}}{J_c^{исх}} = \frac{\epsilon_{f(crack)}^{obl}}{\epsilon_{f(crack)}^{исх}} \cdot \frac{\sigma_{flow}^{obl}}{\sigma_{flow}^{исх}}$$

$$\sigma_{flow} = \frac{\sigma_{0,2} + \sigma_B}{2}$$



Влияние распухания на статическую трещиностойкость аустенитных сталей

Экспериментальные данные получены на металле экранной сборки Э-65 реактора БОР-60 из стали 12Х18Н10Т, облученной до доз **100-150 сна** при **T=320-370°C** в течение **41 года** эксплуатации.

Трещиностойкость материала можно представить в виде:

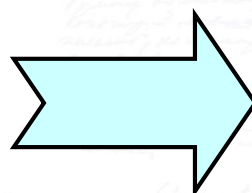
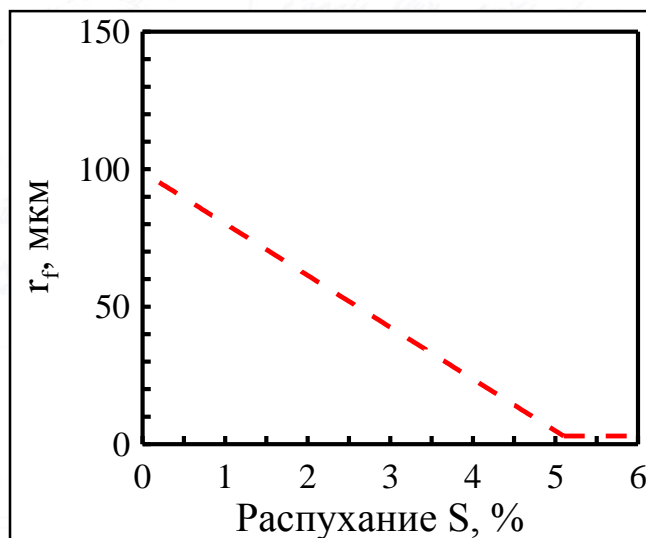
$$J_c \sim \sigma_{\text{flow}} \cdot r_f \cdot \epsilon_{f_crack}$$

где ϵ_{f_crack} – критическая деформация в вершине трещины, r_f – размер “зоны процесса”, т.е. минимальной области, в которой происходит элементарный акт разрушения материала по тому или иному механизму, $\sigma_{\text{flow}} = (\sigma_{0,2} + \sigma_B)/2$.

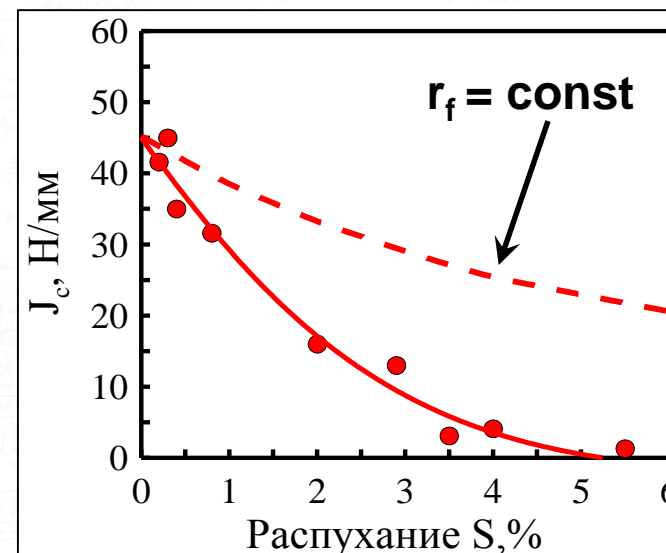
Распухание снижает ϵ_{f_crack} и σ_{flow} гораздо слабее, чем падает трещиностойкость.

Следовательно, распухание сильно влияет на размер зоны процесса r_f .

Влияние распухания на размер зоны процесса r_f



Влияние распухания на статическую трещиностойкость J_c





НАУКА
И ИННОВАЦИИ
РОСАТОМ

Спасибо за внимание



Homo · Science

РОСАТОМ

ГОД НАУКИ И ТЕХНОЛОГИЙ В РОССИИ