

Прогнозирование влияния предварительного термомеханического нагружения на повышение сопротивления хрупкому разрушению конструкционных теплоустойчивых сталей с трещинами. Сообщение 1. Модель и методика расчета эффекта предварительного термомеханического нагружения

В. В. Покровский, А. Г. Иванченко

Институт проблем прочности НАН Украины, Киев, Украина

На основе проведенных исследований предложены физико-механическая модель предварительного термомеханического нагружения и методика расчета этого эффекта для теплоустойчивых сталей. Методика базируется на анализе изменения напряженно-деформированного состояния в элементарном объеме материала у вершины трещины во время предварительного термомеханического нагружения и при последующем нагружении. Данная методика позволяет учитывать такие факторы, определяющие воздействие предварительного термомеханического нагружения на сопротивление теплоустойчивых сталей хрупкому разрушению, как затупление вершины трещины, остаточные напряжения и упрочнение материала у вершины трещины.

Ключевые слова: предварительное термомеханическое нагружение, хрупкое разрушение, остаточные напряжения.

Введение. Проблеме повышения сопротивления теплоустойчивых сталей хрупкому разрушению после предварительного термомеханического нагружения (ПТН) посвящены многочисленные исследования [1–9]. Это связано как с практической значимостью данного процесса, с использованием которого можно увеличить несущую способность элементов конструкций атомных энергетических установок [1], так и с его сложностью.

Анализ приведенных в литературных источниках данных показал, что существует общее представление о характере и механизмах повышения вязкости разрушения после ПТН [1] (рис. 1). В то же время не установлена роль каждого из механизмов повышения вязкости разрушения для материалов с разными свойствами, что не позволяет в полной мере изучить влияние различных факторов на эффект ПТН, особенно на его устойчивость под влиянием эксплуатационных факторов. Поэтому известные модели ПТН [5, 7] и основанные на них методики расчета эффекта ПТН не могут претендовать на полноту отображения этого сложного вопроса, а значит, на достаточно точное качественное и количественное его решение.

Для выяснения характера влияния эксплуатационных факторов на эффект ПТН и вклада разных механизмов в повышение вязкости разрушения после ПТН авторами была проведена серия экспериментальных исследований, результаты которых опубликованы ранее [10]. В процессе исследований подтвердилось, что существующие модели предварительного термомеханического нагружения тела с трещиной [1, 5, 7] позволяют удовлетворительно описать эффект повышения вязкости разрушения в определенных границах. Однако с достаточной точностью описать его при некоторых

режимах ПТН нельзя, поскольку использование этих моделей сопряжено с определенными трудностями. В частности, методика расчета эффекта ПТН, основанная на модифицированном J -интеграле и известная как “модель Челла” [5, 7], которая использует различие размеров пластических зон, не учитывает такой значимый фактор, как затупление вершины трещины, которое может остаться после снятия нагрузки.

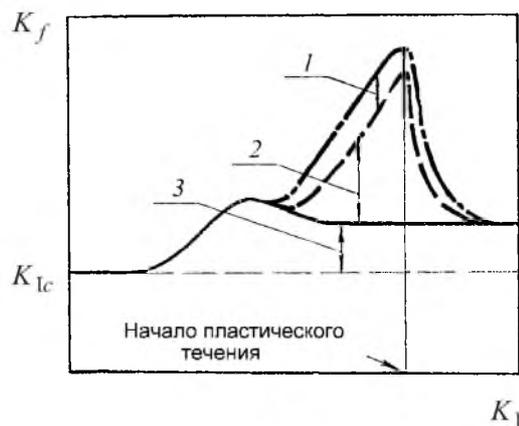


Рис. 1. Зависимость вклада различных механизмов повышения вязкости разрушения в эффект ПТН от величины перегрузки: 1 – деформационное упрочнение; 2 – затупление трещины; 3 – остаточные сжимающие напряжения.

Таким образом, изложенное выше свидетельствует о необходимости создания модели, позволяющей с достаточной точностью прогнозировать изменение вязкости разрушения после ПТН с учетом влияния различных эксплуатационных факторов и механических свойств теплоустойчивых сталей. Такая модель должна адекватно описывать процессы у вершины трещины при ПТН и после него и таким образом учитывать все стороны этого явления.

Физико-механические предпосылки. Предлагаемая модель предназначена для описания процессов у вершины трещины при ПТН по различным схемам [10], а именно: по схеме без разгрузки, а также с частичной и полной разгрузкой. Последняя схема наиболее перспективна для практического применения, но наименее точно описываемая с помощью существующих методик. Модель строится на следующих допущениях и предпосылках.

1. Область у вершины трещины разбивается на элементарные объемы (ЭО), внутри которых напряженно-деформированное состояние (НДС) принимается однородным. Разрушение наиболее нагруженного ЭО приводит к страгиванию трещины и разрушению всего тела. Самым нагруженным считается наиболее близкий к вершине трещины элементарный объем [11].

2. На нижнем шельфе температурной зависимости вязкости разрушения как после ПТН, так и в случае, когда тело с трещиной не подвергалось ПТН, разрушение происходит хрупко при превышении напряжениями в одном из ЭО напряжений микроскола σ_c , что приводит к страгиванию микротрещины и ее объединению с макротрещиной.

3. Предварительное термомеханическое нагружение тела с трещиной проводится при температуре выше температуры вязкохрупкого перехода, т.е. когда материал разрушается вязко. Поэтому максимально возможной нагрузкой для тела будет величина P_f , при которой в одном из ЭО деформация достигнет критического значения $\varepsilon = \varepsilon_f$. Напряженно-деформированное состояние при ПТН и после него оценивается в ближайшем к вершине трещины ЭО, так как в нем наиболее вероятно зарождение разрушения.

4. Диаграмма деформирования материала описывается с помощью зависимости [12]

$$\sigma_i = \sigma_{0,2} + A(\varepsilon_i)^n, \quad (1)$$

где $\sigma_{0,2}$ – предел текучести материала; A и n – эмпирические коэффициент и показатель, определенные из реальной диаграммы деформирования материала.

5. Напряженно-деформированное состояние оценивается в геометрически нелинейной постановке, поскольку при наличии пластической деформации у вершины трещина притупляется.

6. Повышение сопротивления сталей хрупкому разрушению на нижнем шельфе температурной зависимости после ПТН обусловлено изменениями в напряженно-деформированном состоянии, а именно: наведением системы остаточных сжимающих напряжений; затуплением вершины трещины и деформационным упрочнением материала у вершины трещины.

Методика расчета эффективности ПТН. На основе этих положений разработана методика расчета эффекта повышения сопротивления теплоустойчивых сталей после ПТН хрупкому разрушению.

Рассмотрим четыре последовательные стадии нагружения:

1) нагружение материала с трещиной при температуре выше температуры изменения характера разрушения от вязкого к хрупкому ($T_{хвп}$) до определенного значения $K = K_{птн}$;

2) разгрузка при той же температуре до значения $K = K_2$;

3) охлаждение до температуры ниже температуры $T_{хвп}$;

4) нагружение материала при температуре ниже температуры $T_{хвп}$ до разрушения ($K = K_f$).

При ПТН по схеме без разгрузки имеем $K_2 = K_{птн}$, в то время как по схеме с полной разгрузкой – $K_2 = 0$.

Процессы, происходящие у вершины трещины на первой стадии, достаточно хорошо изучены [1, 3, 5, 6, 8]. При нагружении до уровня $K = K_{птн}$ в ЭО возникают напряжения $\sigma_{птн}$ и деформации $\varepsilon_{птн}$ (рис. 2), а раскрытие вершины трещины (РВТ) достигает величины $\delta_{птн}$. Деформации $\varepsilon_{птн}$ можно разложить на упругую $\varepsilon_{птн}^e$ и пластическую $\varepsilon_{птн}^p$ составляющие.

Стадию разгрузки для ЭО можно условно разделить на два этапа. На первом этапе происходит упругая разгрузка до уровня $\sigma = 0$ и $\varepsilon = \varepsilon_{птн}^p$. При этом к образцу все еще приложена нагрузка $K > 0$. Дальнейшая разгрузка до уровня $K = 0$ приводит к сжатию материала. Напряжения в ЭО после разгрузки равны σ_{res} .

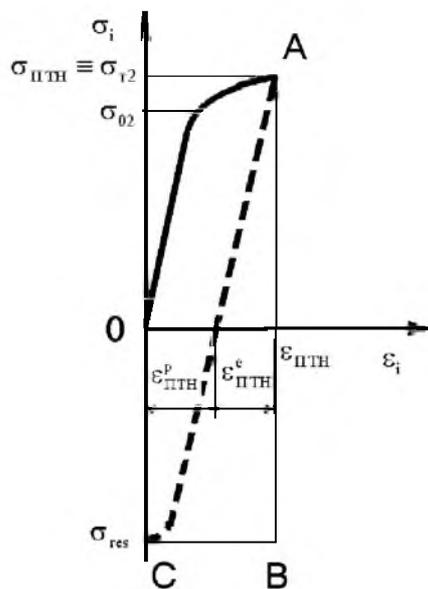


Рис. 2. Интенсивность напряжений и деформаций в ЭО при ПТН. (Сплошная линия – нагружение, штриховая – разгрузка.)

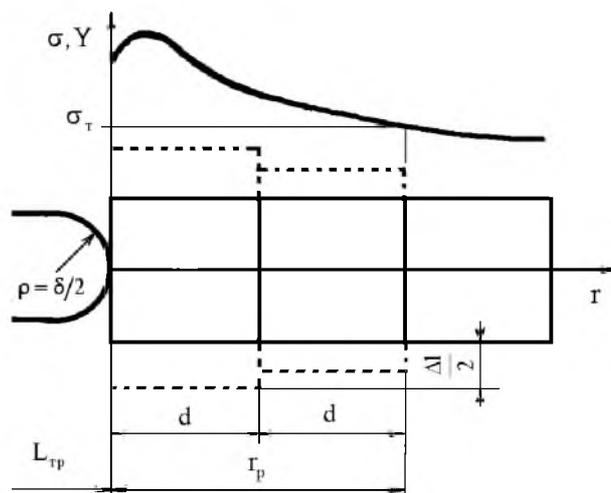


Рис. 3. Распределение напряжений у вершины трещины и деформирование ЭО при ПТН: $L_{тр}$ – длина трещины; ρ – радиус затупления вершины трещины, равный половине раскрытия вершины трещины δ ; σ_T – предел текучести; d – размер ЭО; r_p – размер пластической зоны; Δl – необратимое (пластическое) удлинение ЭО.

Сжатие материала происходит вследствие того, что при его нагружении у вершины трещины образуется зона пластической деформации (рис. 3). Когда в элементарных объемах, попавших в эту зону, запас накопленной во время нагружения упругой энергии исчерпан, в ЭО за пределами пластической зоны имеют место упругие деформации, энергия которых направлена на восстановление равновесного состояния, существовавшего до нагружения. Поскольку ЭО внутри пластической зоны получили значительное необратимое удлинение Δl по координате Y (рис. 3) по сравнению с осталь-

ными элементарными объемами, то по мере разгрузки они подвергаются сжатию со стороны упругого материала. Сжатие ЭО у вершины трещины на втором этапе разгрузки происходит до тех пор, пока в теле не установится равновесие. Пластически деформированные упрочненные ЭО не позволяют закрыться трещине в ее вершине, чем объясняется существование остаточного раскрытия вершины трещины после ПТН. При этом закрытие трещины происходит на некотором расстоянии позади ее вершины.

Если величина разгрузки такова, что при $K = K_2$ в ближайшем к вершине трещины ЭО напряжения будут равны нулю, то остаточные сжимающие напряжения отсутствуют.

На последней стадии материал после охлаждения до температуры ниже температуры хрупкости нагружается до разрушения.

Рассмотрим особенности нагружения материала после ПТН по различным схемам.

Нагружение по схеме без разгрузки. В момент начала нагружения в ЭО у вершины трещины имеют место напряжения $\sigma = \sigma_{\text{ПТН}}$ и деформации $\varepsilon = \varepsilon_{\text{ПТН}}$. Вследствие упрочнения материала ЭО эффективный предел текучести $\sigma_{\text{ТЗ}}$ будет соответствовать накопленной пластической деформации $\varepsilon_{\text{ПТН}}^p$ (рис. 4,а). В процессе нагружения напряжения в ЭО будут изменяться по линейному закону

$$\sigma = \frac{\varepsilon E}{2(1 + \mu)} \quad (2)$$

до достижения уровня $\sigma = \sigma_{\text{ТЗ}}$. После этого изменение напряжений с ростом деформаций носит нелинейный характер и описывается формулой (1). По достижении уровня напряжений $\sigma = \sigma_c$ ЭО разрушается, что приводит к страгиванию трещины. При этом следует учитывать, что величина напряжения микроскола σ_c зависит от накопленной пластической деформации [11,13]. Методика получения подобной зависимости детально описана в работах [11, 13]. Приведенная на рис. 5 экспериментальная зависимость σ_c от ε_i^p для стали 15Х2МФА (Ш) имеет возрастающий характер.

Нагружение по схеме с полной разгрузкой. В момент начала нагружения наблюдается остаточное раскрытие вершины трещины, в ЭО у вершины трещины имеют место напряжения $\sigma = \sigma_{\text{res}}$, и материал упрочнен. Ввиду наличия остаточного раскрытия (начального притупления) трещины сингулярность напряжений у ее вершины будет существенно отличаться от сингулярности для острой трещины, и напряжения в соответствующем ЭО будут значительно ниже. Кроме того, до уровня нагружения K_{res} , при котором в не подвергнутом ПТН материале с притупленной трещиной напряжения по абсолютной величине равны остаточным, $\sigma = \sigma_{\text{res}}$, будет происходить разгрузка ЭО до нейтрального НДС, когда $\sigma = 0$ (рис. 4,б). И только при $K \geq K_{\text{res}}$ напряжения в ЭО начнут увеличиваться от нуля до критического напряжения микроскола σ_c . Влияние упрочнения материала на повышение сопротивления хрупкому разрушению выражается в увеличении значения σ_c по мере роста накопленной пластической деформации (рис. 5).

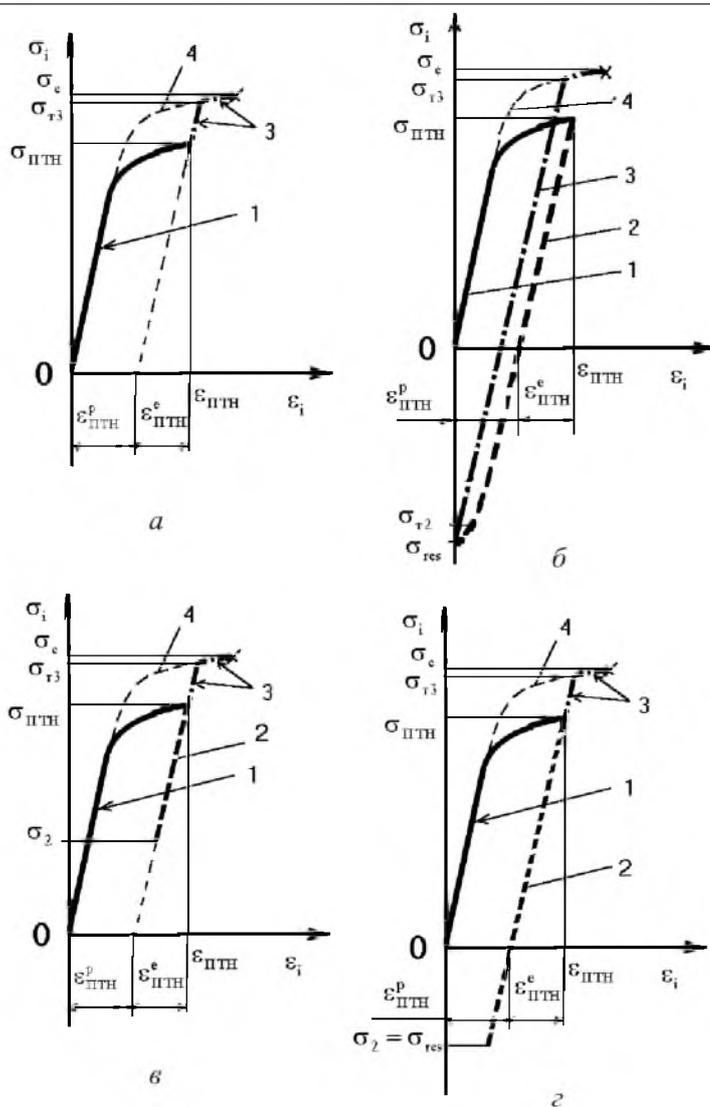


Рис. 4. Изменение интенсивностей напряжений и деформаций на разных стадиях ПТН: а – без разгрузки; б – полная разгрузка; в – частичная разгрузка при отсутствии остаточных сжимающих напряжений (1, 2 – соответственно нагружение и разгрузка при температуре $T_{ПТН}$; 3 – нагружение при температуре разрушения T_f ; 4 – зависимость интенсивности напряжений от деформаций неперегруженного материала при T_f).

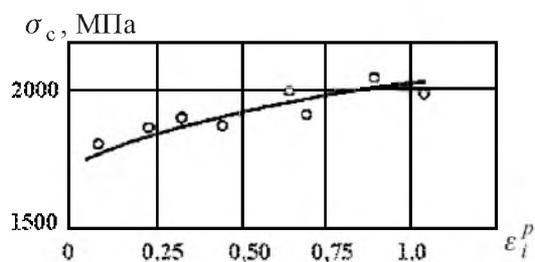


Рис. 5. Экспериментальная зависимость напряжения микроскола σ_c от накопленной пластической деформации ϵ_i^p для стали 15X2МФА (III).

Нагружение по схеме с частичной разгрузкой. Такое нагружение является промежуточным между нагружением по двум схемам, рассмотренным выше. Его, в свою очередь, можно разделить на два следующих:

1) разгрузка такова, что при $K = K_2$ в ближайшем к вершине трещины ЭО существуют растягивающие напряжения $\sigma_2 \geq 0$, деформации равны ε_2 (рис. 4,б), а раскрытие вершины трещины $\delta = \delta_{res}$ соответствует уровню разгрузки K_2 . По мере нагружения напряжения и деформации в ЭО изменяются таким же образом (рис. 4,б), как и в случае ПТН без разгрузки, т.е. линейно до достижения эффективного предела текучести $\sigma = \sigma_{T3}$, и далее в соответствии с диаграммой деформирования материала. При расчете напряжений у вершины трещины учитывается изменение их сингулярности вследствие затупления вершины. По достижении уровня напряжений $\sigma = \sigma_c$ ЭО разрушается, что приводит к страгиванию трещины;

2) уровень разгрузки таков, что в ближайшем к вершине трещины ЭО имеют место остаточные сжимающие напряжения $\sigma_2 = \sigma_{res}$, соответствующие уровню разгрузки K_2 (рис. 4,з), а раскрытие вершины трещины $\delta = \delta_{res}$ соответствует уровню разгрузки K_2 . По мере нагружения напряжения в ЭО будут изменяться так же, как и в случае ПТН с полной разгрузкой, а именно: от $\sigma = \sigma_{res}$ до $\sigma = 0$, затем от $\sigma = 0$ до $\sigma = \sigma_c$ (рис. 4,з).

Расчет остаточного раскрытия вершины трещины и остаточных сжимающих напряжений. Для оценки НДС в ЭО на последней стадии нагружения необходимо располагать величинами остаточного раскрытия вершины трещины и остаточных сжимающих напряжений. Их можно вычислить с помощью численных методов. Авторы предлагают упрощенную методику решения этой задачи на основе анализа НДС наиболее опасного ЭО.

Данная методика базируется на том, что пластическая деформация локализована в небольшой области у вершины трещины. Таким образом, можно считать, что материал, за исключением некоторого небольшого числа ЭО у вершины трещины, деформируется упруго. Следовательно, все потери энергии упругопластической деформации можно отнести к этой пластической зоне.

Рассмотрим ближайший к вершине трещины ЭО. Раскрытие вершины трещины оценим по формуле, предложенной в работе [14]:

$$\delta = \alpha \frac{K^2}{\sigma_T^{eff} E}, \quad (3)$$

где K – текущий коэффициент интенсивности напряжений; E – модуль Юнга; σ_T^{eff} – эффективный предел текучести материала; α – коэффициент, вычисляемый по формуле [14]

$$\alpha = 0,6 \left(\frac{(2/\sqrt{3})(1+\mu)(1+n)\sigma_T^{eff}}{nE} \right)^n \quad (4)$$

(μ – коэффициент Пуассона).

При нахождении остаточного раскрытия вершины трещины δ_{res} следует учитывать, что материал, нагруженный до уровня выше предела текучести $\sigma_{T2} > \sigma_{0,2}$, при последующем после разгрузки нагружении будет деформироваться пластически, только начиная с уровня нагружения, соответствующего $\sigma \geq \sigma_{T2}$ (рис. 2), т.е. можно говорить о новом пределе текучести для пластически деформированного материала. Поскольку изменение раскрытия вершины трещины происходит преимущественно за счет пластической деформации, при разгрузке его уменьшение необходимо оценивать уже с учетом изменившегося (возросшего) предела текучести.

Исходя из вышеизложенного порядок расчета δ_{res} таков:

1) по формуле (3) определяется РВТ при предварительном термомеханическом нагружении, $\delta_{ПТН} = f(K_{ПТН})$ – (рис. 6);

2) рассчитываются напряжения в ближайшем к вершине трещины ЭО при $K = K_{ПТН}$. В случае если полученные напряжения превышают предел текучести ($\sigma_{ПТН} \geq \sigma_T$), то эффективный предел текучести материала ЭО равен напряжениям при ПТН ($\sigma_{T2} = \sigma_{ПТН}$, индекс “Т2” обозначает, что данное значение предела текучести действительно на второй стадии ПТН – стадии разгрузки);

3) по формуле (3) рассчитывается и “обратное раскрытие” вершины трещины δ_2 (уменьшение полученного при ПТН раскрытия) при разгрузке. При этом вместо σ_T в формулу подставляется значение $\sigma_{T2} = \sigma_{ПТН}$, и расчет проводится от $K = 0$ до $K = K_{ПТН}$ с началом координат в точке *A* (рис. 6), соответствующей $K_{ПТН}$ и $\delta_{ПТН}$;

4) остаточное раскрытие вершины трещины δ_{res} равно разности абсолютных величин раскрытия при ПТН $\delta_{ПТН}$ и обратного раскрытия δ_2 при разгрузке:

$$\delta_{res} = |\delta_{ПТН}| - |\delta_2|. \quad (5)$$

Характер расчетных зависимостей $\delta = f(K)$ и $\delta_{res} = f(K_{ПТН})$ совпадает с типичными диаграммами нагрузка *P* – РВТ δ , записанными в окрестности вершины трещины с помощью тензодагчиков.

При расчете остаточных сжимающих напряжений будем исходить из того, что на сжатие ЭО расходуется только энергия упругих деформаций. Поэтому очевидно, что отношение работы упругих деформаций к работе упругопластических деформаций в ЭО не может быть больше, чем для всего тела. Следовательно, имеет место выражение

$$(U_g^e / U_g^g) \geq (U_l^e / U_l^g), \quad (6)$$

где U_g^e и U_g^g – работа упругих и упругопластических деформаций во всем теле; U_l^e и U_l^g – работа упругих и упругопластических деформаций в ЭО.

Отношение работ для тела находится из отношения площадей под диаграммой *P* – δ , записанной по линии действия силы (рис. 7), где работа упругих деформаций вычисляется как площадь треугольника *ABC*, а работа упругопластических деформаций – как площадь криволинейного треугольника *OAB*.

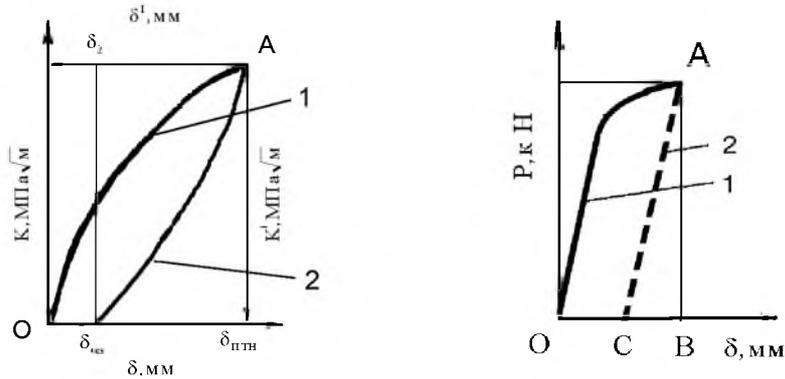


Рис. 6. Диаграмма коэффициент интенсивности напряжений K – раскрытие вершины трещины δ : 1 – нагружение; 2 – разгрузка.

Рис. 7. Диаграмма нагрузка P – раскрытие вершины трещины δ , записанная по линии действия силы при нагружении (1) и разгрузке (2).

Отношение работ для ЭО определяется из отношения площадей под диаграммой напряжения σ_i – деформации ϵ_i , полученной при анализе НДС (рис. 2). В этом случае работа упругих деформаций вычисляется как площадь криволинейного треугольника ABC , а работа упругопластических деформаций – как площадь криволинейной трапеции $OABC$.

Кроме баланса работ следует учитывать невозможность наличия отрицательных деформаций в ЭО при разгрузке, так как для этого следовало бы приложить работу большую, чем та, что была запасена при предварительном нагружении. Таким образом, сжатие ЭО будет происходить до тех пор, пока выполняется условие

$$\epsilon \geq 0, \tag{7}$$

где ϵ – деформация ЭО после разгрузки (рис. 4).

Исходя из вышеизложенного можно заключить, что остаточные напряжения в ЭО равны максимальным сжимающим напряжениям, полученным при упругопластическом сжатии материала с учетом условий (6) и (7). Если допустить, что для материалов данного класса пределы текучести при растяжении и сжатии равны, то можно принять за предел текучести при сжатии максимальное напряжение, достигнутое при предварительном нагружении $\sigma_{\text{ПТН}}$.

В общем случае после ПТН по любой схеме КИН, при котором произойдет разрушение материала при температуре T_3 , вычисляется следующим образом:

$$\begin{cases} K_f = K|_{\sigma=\sigma_c} + K_2 - K|_{\sigma=|\sigma_{res}|} & \text{при } \sigma_{res} \geq 0; \\ K_f = K|_{\sigma=\sigma_c} + K_2 + K|_{\sigma=|\sigma_{res}|} & \text{при } \sigma_{res} < 0, \end{cases} \tag{8}$$

где K_f – КИН разрушения; K_2 – КИН разгрузки; $K|_{\sigma=\sigma_c}$ – КИН, при котором напряжения в ЭО достигают величины σ_c при “простом нагружении” (рис. 4); $K|_{\sigma=|\sigma_{res}|}$ – КИН, при котором напряжения в ЭО достигают

абсолютной величины остаточных напряжений σ_{res} при “простом нагружении” рис. 4. (“Простое нагружение” – это нагружение без разгрузки при температуре T_3 с учетом упрочнения материала и изменения сингулярности напряжений у вершины трещины за счет ее затупления после ПТН.)

Заключение. Предложенная методика оценки эффекта предварительного термомеханического нагружения основана на комплексном анализе влияния различных механизмов повышения вязкости разрушения после ПТН с учетом таких факторов, как затупление вершины трещины, упрочнение материала и наличие остаточных сжимающих напряжений у вершины трещины.

С помощью методики можно объяснить абсолютное уменьшение эффекта ПТН с понижением температуры разрушения образцов после ПТН. Ввиду того что с понижением температуры повышается предел текучести теплоустойчивых сталей, разрушение происходит при значительно меньших пластических деформациях. Таким образом, разрушение как подвергнутых ПТН, так и образцов без ПТН происходит при нагрузках, соответствующих минимальным значениям напряжения микроскола σ_c , зависящего от накопленной до разрушения пластической деформации [11, 13].

Данная методика позволяет учитывать влияние разных факторов на каждый из механизмов, обуславливающих повышение вязкости разрушения материала после ПТН, и может быть применена для обоснования устойчивости эффекта ПТН в ходе эксплуатации материала, а также для решения других задач, связанных с ним.

Резюме

На основі проведених досліджень запропоновано фізико-механічну модель попереднього термомеханічного навантаження та методику розрахунку цього ефекту для теплостійких сталей. Методика базується на аналізі зміни напружено-деформованого стану в елементарному об'ємі матеріалу у вістрі тріщини під час попереднього термомеханічного навантаження та при наступному. Використання методики дозволяє врахувати такі основні фактори, що визначають вплив попереднього термомеханічного навантаження на опір теплостійких сталей крихкому руйнуванню, як затуплення вістря тріщини, залишкові напруження та зміцнення матеріалу біля вістря тріщини.

1. *Pokrovskii V. V., Troshchenko V. T., Kaplunenko V. G., et al.* A promising method for enhancing resistance of pressure vessels to brittle fracture // *Int. J. Pres. Ves. Piping.* – 1994. – **58.** – P. 9 – 24.
2. *Накамура Х., Кобаяши Х., Кодайра Т., Накарава Х.* К влиянию предварительного нагружения на вязкость разрушения стали А533В1 // *Материалы Междунар. конф. по разрушению (Канны, март–апрель 1981).* – М.: НИИИНФОРМЭРГОМАШ. – 1985. – Вып. 3. – С. 27 – 38.
3. *Беремин Ф. М.* Численное моделирование влияния теплового предварительного нагружения с использованием функции повреждения при

- разрушении разрывом // Материалы Междунар. конф. по разрушению (Канны, март–апрель 1981). – М.: НИИИНФОРМЭНЕРГОМАШ. – 1985. – Вып. 3. – С. 27 – 38.
4. *Reed P. A. S. and Knott J. F.* An investigation of the warm prestressing (WPS) effect in A533B weld metal // *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* – 1992. – **15**, No. 12. – P. 1251 – 1270.
 5. *Chell G. G., Haigh J. R., and Vitek V. A.* Theory of warm prestressing: experimental validation and the implications for elastic plastic failure criteria // *Int. J. Fract.* – 1981. – **17**, No. 1. – P. 61 – 81.
 6. *Curry D. A.* A micromechanistic approach to the warm prestressing of ferritic steels // *Ibid.* – No. 3. – P. 335 – 342.
 7. *Timofeev B. T. and Smirnov V. I.* Calculated and experimental estimation of preliminary loading effect at elevated temperatures on fracture toughness of pressure vessel materials // *Int. J. Pres. Ves. Piping.* – 1995. – **63**. – P. 135 – 140.
 8. *Lidbury D. and Birkett P.* Effects of warm prestressing on the transition toughness behavior of an A533 Grade B Class 1 pressure vessel steel // *Fracture Mechanics: Twenty-First Symposium, ASTM STP 1074.* – 1990. – P. 264 – 285.
 9. *Shum D. K. M.* Warm prestress effects in fracture-margin assessment of PWR-RPVS // *SMiRT-12 / Ed. K. Kussmaul.* – Elsevier Science Publishers, 1993. – P. 333 – 338.
 10. *Покровский В. В., Иванченко А. Г.* Влияние режимов предварительного термомеханического нагружения на повышение сопротивления хрупкому разрушению теплоустойчивых сталей // *Пробл. прочности.* – 1999. – № 2. – С. 126 – 138.
 11. *Карзов Г. П., Марголин Б. З., Швецова В. А.* Физико-механическое моделирование процессов разрушения. – СПб.: Политехника, 1993. – 389 с.
 12. *Разрушение: В 7 т. / Под ред. Г. Либовица.* – М.: Мир; Машиностроение, 1973–1976. – 3216 с.
 13. *Троценко В. Т., Покровский В. В., Каплуненко В. Г.* Прогнозирование трещиностойкости теплоустойчивых сталей с учетом влияния размеров образцов. Сообщ. 1. Результаты экспериментальных исследований // *Пробл. прочности.* – 1997. – № 1. – С. 5 – 27.
 14. *Механика разрушения и прочность материалов. Справочное пособие: В 4 т. / Под общ. ред. В. В. Панасюка.* – Киев: Наук. думка, 1988–1990. – 680 с.

Поступила 26. 12. 2000