

Вязкохрупкий переход в хладноломких металлах при многоцикловом нагружении

И. С. Пиняк

Институт проблем прочности НАН Украины, Киев, Украина

На базе экспериментальных данных, полученных при многоцикловом нагружении хладноломких сталей, определены критические характеристики вязкохрупкого перехода. С помощью критерия инвариантности эффективной кинетической диаграммы усталостного разрушения – ограниченного и текущего эффективного размаха коэффициента интенсивности напряжений ($\Delta K_{fcl.th,T_2} \leq \Delta K_{eff} \leq \Delta K_{eff,T_1}^{J,mv}$) эти характеристики описывают границы существования такого явления, как вязкохрупкий переход, а также определяют первую T_{c1} и вторую T_{c2} критические температуры хрупкости. Установлено, что эффективный размах коэффициента интенсивности напряжений ΔK_{eff} , определенный методом измерения текущего раскрытия вершины трещины, является локальной характеристикой трещиностойкости материала в линейно-упругой механике разрушения.

Ключевые слова: критические характеристики вязкохрупкого перехода, критерий инвариантности, эффективный размах коэффициента интенсивности напряжений.

Обозначения

T	– температура
T_{c1}, T_{c2}	– первая и вторая критические температуры хрупкости
σ_y	– физический предел текучести
$\sigma_{0,2}$	– условный предел текучести
σ_B	– предел прочности
σ_0	– номинальное напряжение
σ_{co}	– номинальное разрушающее напряжение по ослабленному сечению образца
K_{Ic}	– критический коэффициент интенсивности напряжений (КИН) для трещины отрыва (тип I) при статическом нагружении
K_{min}, K_{max}	– минимальный и максимальный КИН в цикле
R	– асимметрия цикла нагружения образца, $R = K_{min} / K_{max}$
ΔK	– номинальный размах КИН в цикле, $\Delta K = K_{max} - K_{min}$
ΔK_{eff}	– эффективный размах КИН в цикле, $\Delta K_{eff} = \Delta K - \Delta K_{cl}^{op}$
ΔK_{cl}^{op}	– характеристика закрытия трещины в цикле, $\Delta K_{cl}^{op} = K_{max} - K_{op}$
K_{op}	– КИН раскрытия трещины в цикле
$\Delta K_{fcl.th,T_2}$	– критический пороговый эффективный размах КИН при второй температуре хрупкости (нижняя граница роста усталостной трещины при наличии ее закрытия)

$\Delta K_{fcl,T}$	– критический эффективный размах КИН при разных температурах (верхняя граница роста усталостной трещины при наличии ее закрытия)
$\Delta K_{eff,T_1}^{f.inv}, \Delta K_{eff,T_2}^{f.inv}$	– соответственно первый и второй критические эффективные размахи КИН (критические характеристики определены при первой T_{c1} и второй T_{c2} критических температурах хрупкости) потери инвариантности эффективной кинетической диаграммы усталостного разрушения (КДУР) к асимметриям цикла нагружения, исследованным при комнатной температуре, и низким температурам
$\Delta K_{eff,T_x}^{f.inv}$	– критический эффективный размах КИН потери “ручейковой” инвариантности эффективной КДУР к низким температурам
ΔK_{eff}^{inv}	– характеристика инвариантности эффективной КДУР (в том числе низкотемпературной и “ручейковой” инвариантности) к асимметриям цикла нагружения, исследованным при комнатной температуре, и низким температурам
P_{op}	– усилие, необходимое для раскрытия вершины трещины
da/dN	– скорость роста усталостной трещины (РУТ)
C_1, C_3, n_1, n_3	– эффективные характеристики материала в формуле Париса
C_2, C_4, n_2, n_4	– номинальные характеристики материала в формуле Париса
l_z	– размер зерна
m_z	– количество бороздок усталости в зерне z размером l_z

Постановка задачи. Анализ известных данных [1–27] показывает, что для хладноломких металлов характерно явление вязкохрупкого перехода, ограниченного переходными температурами хрупкости.

Согласно работам [16–19], переходными температурами считаются температуры хрупкости: первая T_{c1} , соответствующая переходу от вязкого разрушения к квазихрупкому, и вторая T_{c2} – от квазихрупкого разрушения к хрупкому. Температуры хрупкости называют еще критическими температурами хрупкости, или температурами хладноломкости вязкохрупкого перехода.

Температуры T_{c1} и T_{c2} соответствуют, в сравнительно узком температурном интервале, резкому изменению характеристик разрушения (ударная вязкость, остаточное относительное удлинение или поперечное сужение, доля волокнистого излома, местные пластические деформации, коэффициент интенсивности напряжений, характерный размер критической пластической зоны в вершине трещины). Указанные температуры устанавливаются согласно разным методикам по точкам пересечения температурных зависимостей механических характеристик (условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ и предел прочности σ_b либо предел текучести $\sigma_{0,2}$ и номинальное разрушающее напряжение по ослабленному сечению образца σ_{co} [16, 19, 23]) или по температурным зависимостям (статическая трещиностойкость

K_{Ic} материала [20, 21], высота зоны вытягивания $2h$, которая зависит от критического раскрытия трещины δ_{Ic} , граница выполнения условий плоской деформации [22], приросты трещины Δa_1 и Δa_2 на зависимости $\Delta a - T$ [26], местные пластические деформации, доля вязкой составляющей в изломе, относительное удлинение либо поперечное сужение, КИН, J -интеграл, раскрытие вершины трещины [16, 23]). Однако в настоящее время не существует единого мнения о том, какая из указанных характеристик разрушения наиболее приемлема для определения критических температур хрупкости.

Следует отметить, что величина критической температуры хрупкости зависит от выбора критерия ее определения и влияния основных факторов: скорости деформирования материала у вершины трещины; размера зерна (рост скорости и зерна приводит к повышению критической температуры хрупкости); напряженного состояния у вершины трещины.

Критерии механики разрушения, подобно классическим критериям, базируются на гипотезе механики твердого деформируемого тела, представляющего материал как бесструктурную сплошную среду, и являются, по сути, критериями сравнения, т.е. бесструктурными (абсолютными). Структурные, т.е. локальные, критерии разрушения в отличие от бесструктурных учитывают конкретную структуру материала, а также обусловленный структурой микромеханизм разрушения. Указанные критерии могут основываться на концепции “встречного разрушения” [28], когда очаг разрушения расположен на определенном расстоянии от вершины трещины (определяется положением пика главных растягивающих напряжений в вершине трещины [29], структурой материала [18]), либо на концепции последовательного разрыва межатомных связей (структурных элементов) [30, 31] в вершине трещины.

Определение критических температур хрупкости T_{c1} и T_{c2} (склонности металла к хрупкому разрушению) при статическом нагружении осуществляется по методам [16–26], которые основаны на концепции последовательного разрыва структурных элементов. Созданные на базе указанных методов критерии, устанавливающие величину критических температур хрупкости T_{c1} и T_{c2} , являются абсолютными, поскольку локальные критерии содержат в явном виде характеристики структуры материала, а также отвечают на вопрос, почему данный материал обладает именно такой трещиностойкостью. Необходимо дополнить, что локальные и абсолютные критерии должны быть взаимосвязанными, потому что описывают одно и то же явление.

Для достоверного определения критических температур хрупкости T_{c1} и T_{c2} при циклическом нагружении основополагающими являются данные работ [18, 32–37]. В [32–34] приводятся общие закономерности кинетики РУТ в металлах и сплавах при низких температурах (рис. 1). Авторы работ [18, 33, 35, 37] отмечали, что в начале вязкохрупкого перехода происходит смена механизмов вязкого разрушения на механизмы хрупкого разрушения, т.е. бороздки усталости заменяются фасетками скола. Завершается этот переход преобладанием чистого скола, что приводит к заметному ускорению роста усталостной трещины.

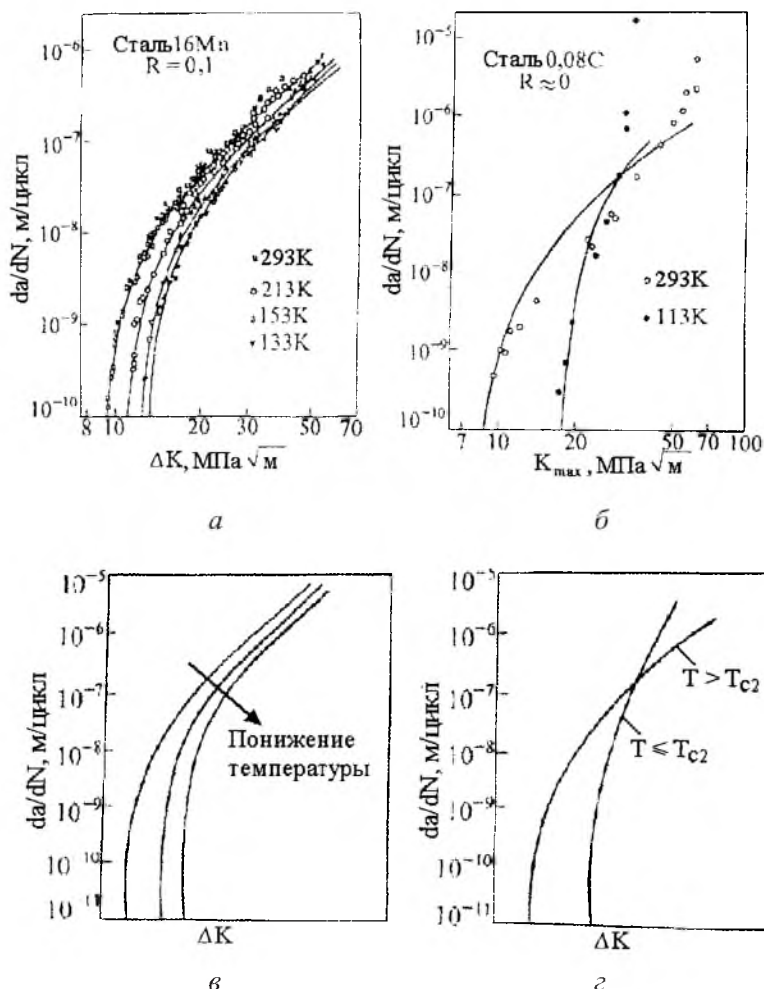


Рис. 1. Рост (а, б) и схема роста (в, г) усталостной макротрещины в хладноломких (а, б, г) и не хладноломких (в) сталях [34] с понижением температуры до наступления хрупкого разрушения.

Функциональные зависимости скорости роста усталостной трещины da/dN от номинального размаха КИН ΔK в логарифмических координатах при комнатной температуре ($T = 293 \text{ K}$) и температуре вязкохрупкого перехода пересекаются в точке, которая, по мнению авторов [18, 33–38], характеризует температуру вязкохрупкого перехода (рис.1). В работах [18, 33, 38] были построены зависимости $da/dN - T$ с целью нахождения (для наглядности РУТ с повышением нагрузки) критического КИН K_{max} (размаха КИН ΔK), при котором произойдет разрушение образца в условиях вязкохрупкого перехода.

Результаты работ [16, 17, 23] показывают, что для металлов и сплавов характерны следующие типы разрушения: хрупкое (номинальное напряжение σ_0 составляет не более 0,7...0,8 физического предела текучести, такое разрушение представляет наибольшую опасность ввиду неожиданности и большой скорости распространения трещины); квазихрупкое ($\sigma_y \leq \sigma_0 \leq \sigma_B$)

и вязкое ($\sigma_0 \geq \sigma_v$). При этом необходимо отметить, что переходные температуры T_{c1} и T_{c2} могут сужать или расширять диапазон типов разрушения, формируемый температурой среды, в которой находится материал [16–18, 23, 27]. Заметим, что многоцикловое нагружение в условиях низкой температуры изменяет тип разрушения при относительно невысоком значении размаха КИН ΔK [18, 33–38]. При этом хорошо проявляются отмеченные выше особенности.

В работе [27] установлено, что: “Граница между мало- и многоцикло- вой усталостью является условной, она характеризует среднее значение долговечностей, при которых происходит переход от малоциклового упруго-пластического к многоцикло-вому упругому циклическому деформированию”. В то же время, согласно [39]: “Багатоциклова втома – це втома матеріалу, за якої втомне пошкодження і руйнування відбуваються без виявлення накопичених деформацій. Малоциклова втома – це втома матеріалу, за якої втомне пошкодження і руйнування відбуваються в основному під час пружно-пластичного деформування”. Из этих заключений, а также из работ [17, 18, 23] следует, что многоцикловая усталость протекает при нагрузках P , которые ниже физического σ_y предела текучести материала, в границах применимости линейно-упругой механики разрушения и ее критериев (номинального ΔK и эффективного ΔK_{eff} размахов КИН, последний из них для определения границ вязкохрупкого перехода еще не рассматривался). При нагрузках P выше физического σ_y предела текучести материала пластические деформации распространяются на все нетто-сечение (разрушение материала сопровождается развитой текучестью в вершине трещины), и критерии линейно-упругой механики разрушения уже неприемлемы. Работают критерии нелинейной механики разрушения (раскрытия трещины δ , J -интеграла, коэффициента интенсивности деформаций), которые применимы к малоцикло-вой усталости.

С учетом особенностей многоцикло-вой усталости, определения температур вязкохрупкого перехода, комплексного влияния во времени величин, формы, характера внешних факторов (коэффициентов асимметрии цикла, комнатной и низких температур) в настоящей работе предпринята попытка экспериментально выявить на эффективной кинетической диаграмме усталостного разрушения характеристики критических температур хрупкости и эмпирически описать границы их наличия.

Описание границ наличия явления вязкохрупкого перехода в условиях многоцикло-вого нагружения. На рис. 2 в координатах $lg da/dN - lg \Delta K_{eff}$, $lg \Delta K$ представлена кинетика роста усталостной макротрещины в сталях 30L-1 и D9H при многоцикло-вом нагружении в условиях разных температур и асимметрии цикла $R = 0,1$. Из рисунка и полученных ранее данных [40] следует, что отрицательные температуры прерывают инвариантность эффективной кинетической диаграммы усталостного разрушения (построена в координатах $lg da/dN - lg \Delta K_{eff}$) к асимметрии цикла нагружения (создана при комнатной температуре) и низким температурам.

Критическая характеристика (всегда будет меньше величины $\Delta K_{fcl,T}$) потери существующей инвариантности эффективной КДУР к различным факторам описывается и обозначается критическим эффективным размахом

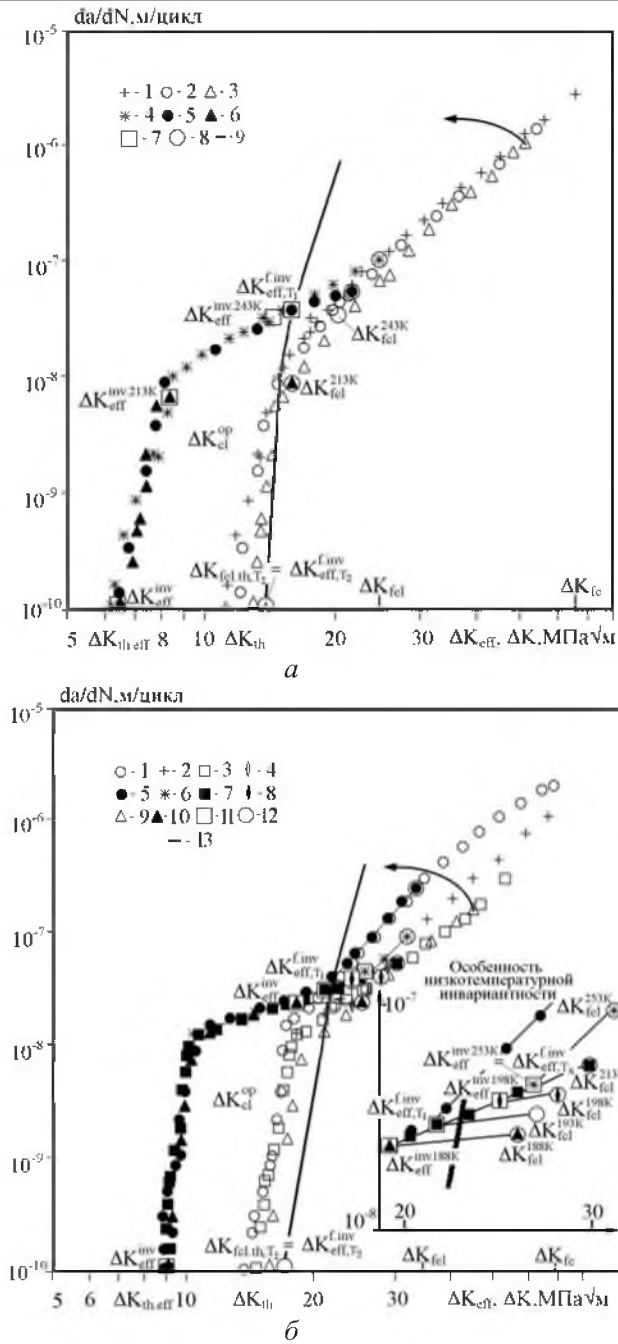


Рис. 2. Зависимость скорости роста усталостной трещины da/dN от ΔK и ΔK_{eff} при разных температурах и асимметрии цикла $R = 0,1$: 1-3, 9 и 1-4, 9, 13 - da/dN от ΔK соответственно для сталей 30L-1 (а) и D9H (б); 4-6 и 5-8, 10 - da/dN от ΔK_{eff} для сталей 30L-1 (а) и D9H (б); а - 1, 4 - $T = 293$ К; 2, 5 - $T = 253$ К; 3, 6 - $T = 213$ К; 9 - $T = 158$ К; 7 - критический момент потери инвариантности эффективной КДУР к асимметрии цикла, комнатной и низким температурам; 8 - нижняя граница роста усталостной трещины при закрытии трещины; б - 1, 5 - $T = 293$ К; 2, 6 - $T = 253$ К; 3, 7 - $T = 213$ К; 4, 8 - $T = 198$ К; 9, 10 - $T = 188$ К; 13 - $T = 125$ К; 11 - критический момент потери инвариантности эффективной КДУР к асимметрии цикла, комнатной и низким температурам; 12 - верхняя граница роста усталостной трещины при закрытии трещины.

КИН потери инвариантности $\Delta K_{eff, T_1}^{f, inv}$ эффективной кинетической диаграммы усталостного разрушения. Меньше величины $\Delta K_{eff, T_1}^{f, inv}$ (рис. 2) эффективная КДУР инвариантна к коэффициентам асимметрии цикла нагружения, созданным при комнатной температуре, и к низким температурам для обеих сталей. Однако их эффективные КДУР при низких температурах по достижении характеристики $\Delta K_{eff, T_1}^{f, inv}$ приобретают свою низкотемпературную – рис. 2,а, иногда своеобразную “ручейковую” инвариантность – рис. 2,б, что свидетельствует об аномалии [33], так называемом “горбе” на номинальной КДУР при комнатной температуре. Такое явление говорит о том, что конструкционный материал создан для конкретных условий эксплуатации (в нашем случае для низких климатических температур; при этом решены структурные, технологические, физико-химические вопросы).

Для стали 30L-1 (рис. 2,а) низкотемпературная инвариантность (незначительна по величине в сравнении с низкотемпературной инвариантностью стали D9H) эффективной КДУР к исследуемым факторам наступает при отрицательной температуре ($T = 253$ К) и значении $\Delta K_{eff, T_1}^{f, inv} \geq 17,4$ МПа $\sqrt{м}$.

При температуре $T = 248$ К низкотемпературная инвариантность эффективной КДУР имеет место, а при $T = 243$ К – отсутствует (эффективная КДУР разрывается). Из-за загромождения семейства КДУР их номинальные и эффективные КДУР при температуре $T = 243$ и 248 К на рис. 2,а не показаны. При низкой климатической температуре ($T = 213$ К) и характеристике инвариантности ΔK_{eff}^{inv} , большей $8,3$ МПа $\sqrt{м}$, заметно увеличивается разрыв эффективной КДУР (рис. 2,а) [40].

Рис. 2,б иллюстрирует инвариантность эффективной КДУР (в координатах $\lg da/dN - \lg \Delta K_{eff}$) к низким температурам и комнатной температуре, а также положительным асимметриям цикла нагружения для стали D9H. Низкотемпературная инвариантность эффективной КДУР наступает при $T = 213$ К и $\Delta K_{eff, T_1}^{f, inv} \geq 21,8$ МПа $\sqrt{м}$ на втором участке эффективной КДУР и сопровождается вязким механизмом разрушения – бороздками усталости [18].

При $T = 253$ К в верхней части эффективной КДУР происходит отклонение “ручейковой” инвариантности от низкотемпературной, которое больше характеристики инвариантности $\Delta K_{eff}^{inv} = 26,3$ МПа $\sqrt{м}$, равной критическому эффективному размаху КИН потери “ручейковой” инвариантности $\Delta K_{eff, T_x}^{f, inv}$ эффективной КДУР, что сопровождается появлением квазитороздок усталости [41]. По-видимому, такое отклонение будет происходить при каждой температуре в диапазоне $253 \text{ К} \geq T \geq 198 \text{ К}$. Если $T > 213$ К, то характеристика “ручейковой” инвариантности ΔK_{eff}^{inv} сначала “скользит” по низкотемпературной инвариантной эффективной КДУР, а затем “ручейки” текут вверх на семействе КДУР, увеличиваясь до $\Delta K_{fcl, T}$. Если же $T < 213$ К, то характеристика ΔK_{eff}^{inv} уменьшается, после чего “скользит” по эффектив-

ной КДУР – от характеристики $\Delta K_{fcl,T}$ до величины $\Delta K_{eff,T_1}^{f,inv} = 21,8 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ (зеркальное отображение “ручейков”, которые текут ниже эффективной КДУР).

В области температуры $T = 213 \text{ К}$ низкотемпературная инвариантность эффективной КДУР соблюдается и сопровождается вязким разрушением – бороздками усталости. Однако выше критических эффективных размахов КИН потери “ручейковой” инвариантности $\Delta K_{eff,T_x}^{f,inv}$ эффективной КДУР с понижением температуры и повышением номинального размаха КИН появляются квазитороздки усталости. При дальнейшем понижении температуры происходит зарождение квазихрупкого разрушения, которое наступает при доминировании хрупкого рельефа излома – фасеток скола.

При температуре $T = 198 \text{ К}$ критический эффективный размах КИН потери “ручейковой” инвариантности эффективной КДУР к низким температурам равен $\Delta K_{eff,T_x}^{f,inv} = \Delta K_{eff}^{inv,198\text{К}} = 24,5 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$. Критический эффективный размах КИН потери инвариантности эффективной КДУР к положительным асимметриям цикла нагружения, комнатной и низким температурам $\Delta K_{eff,T_1}^{f,inv} = 21,8 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$. Значения первого $\Delta K_{eff,T_x}^{f,inv}$ и второго $\Delta K_{eff,T_1}^{f,inv}$ критических эффективных размахов КИН потери инвариантности эффективной КДУР стремятся к равенству.

При $T = 188 \text{ К}$ и характеристике инвариантности $\Delta K_{eff}^{inv} = 18,2 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ происходит разрыв эффективной КДУР, а при $T = 193 \text{ К}$ можно получить равенство критических эффективных размахов КИН потери инвариантности эффективных КДУР, $\Delta K_{eff,T_x}^{f,inv} = \Delta K_{eff,T_1}^{f,inv} = 21,8 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$. Ввиду загромождения семейства КДУР их номинальные и эффективные КДУР при $T = 198$ и 193 К на рис. 2,б не показаны.

Таким образом, при $T = 193 \text{ К}$ наступил вязкохрупкий переход (квазихрупкое разрушения), который характеризуется первой критической температурой хрупкости T_{cl} и определяется величиной $\Delta K_{eff,T_1}^{f,inv} = 21,8 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$. Происходит смена механизма вязкого разрушения (бороздки усталости) на механизм квазихрупкого разрушения (фасетки скола) из-за резкого уменьшения закрытия вершины трещины (остаточных сжимающих напряжений в вершине трещины, т.е. пластических деформаций). Уменьшилась пластичность материала, о чем свидетельствует крутой спад характеристики закрытия трещины ΔK_{cl}^{op} ниже точки $\Delta K_{f,inv}$ конца инвариантности эффективной КДУР (рис. 3,а). Материал стал квазихрупким.

С дальнейшим понижением температуры уменьшаются характеристика инвариантности ΔK_{eff}^{inv} до эффективного порогового размаха КИН $\Delta K_{th,eff} = 8,8 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ (рис. 2,б) и характеристика закрытия трещины ΔK_{cl}^{op} (рис. 3). Заметим, что при каждом понижении температуры происходят разрывы эффективной КДУР, а также выпрямление номинальной КДУР (показано стрелками на рис. 2).

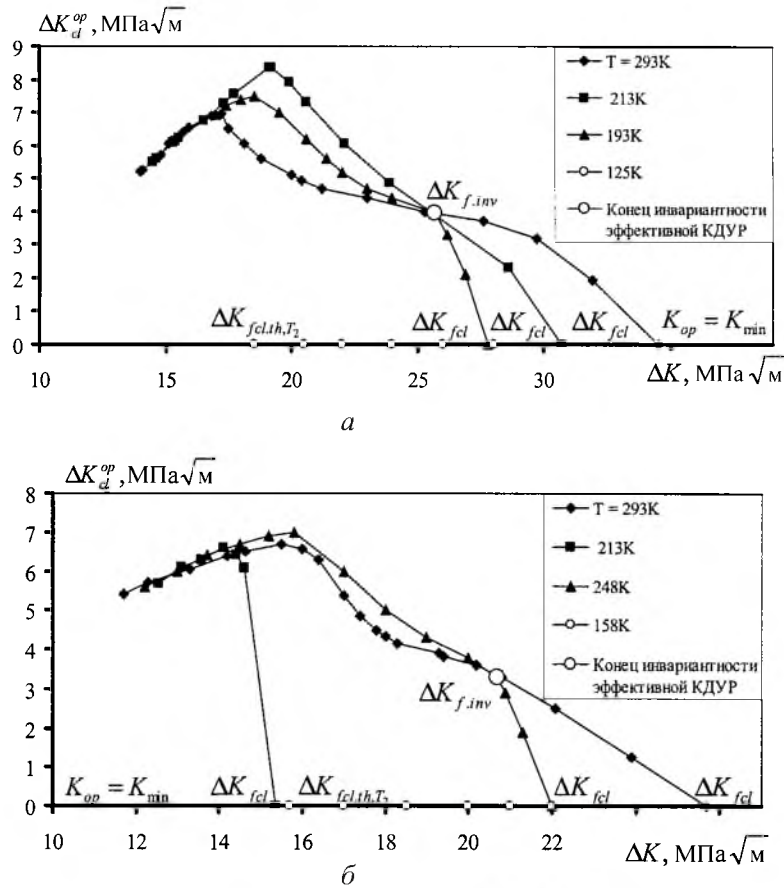


Рис. 3. Зависимость характеристики закрытия трещины ΔK_{cl}^{op} от номинального размаха КИН ΔK для сталей D9H (а) и 30L-1 (б) при разной температуре, асимметрии цикла $R = 0,1$ и частоте нагружения $f = 15$ Гц.

При $T = 125$ К и номинальном пороговом размахе КИН $\Delta K_{th}^{125\text{K}} = 18,5 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ закрытие трещины отсутствует на пороге трещиностойкости ($\Delta K_{cl}^{op} = 0$, на оси абсцисс рис. 3,а прямая линия). При наличии закрытия усталостной трещины наступает нижняя граница ее роста, описываемая критическим пороговым эффективным размахом КИН $\Delta K_{fcl.th,T_2}$ (равен величине $\Delta K_{th}^{125\text{K}} = 18,5 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$) критерия роста усталостной трещины $\Delta K_{fcl.th,R,T,etc.} \leq \Delta K_{eff} \leq \Delta K_{fcl,R,T,etc.}$ [40, 42]. Данный критерий (в его границах) характеризует через запас пластичности (наличие остаточных сжимающих напряжений в вершине трещины, т.е. пластической зоны у вершины трещины с пластическим потоком вдоль ее берегов) наступление хрупкости материала. При $T = 125$ К исчерпан запас пластичности материала, и он стал хрупким.

Таким образом, при $T = 125$ К в стали D9H завершился вязкохрупкий переход и наступило хрупкое разрушение (температура нулевой пластичности – *Авт.*), что характеризуется второй критической температурой хруп-

кости T_{c2} , критическим эффективным размахом КИН потери инвариантности $\Delta K_{eff,T_2}^{f.inv}$ эффективной КДУР, равным критическому пороговому эффективному размаху КИН $\Delta K_{fcl.th,T_2}$ ($\Delta K_{fcl.th,T_2} = \Delta K_{eff,T_2}^{f.inv} = 18,5 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$).

Хрупкое разрушение сопровождается ускорением роста усталостной трещины при увеличении номинального размаха КИН ΔK и отсутствии закрытия трещины на пороге трещиностойкости, т.е. пластичности материала. Номинальная кинетическая диаграмма усталостного разрушения в координатах $\lg da/dN - \lg \Delta K$ приближается к прямой линии (рис. 2). На рельефе излома преобладает хрупкий механизм разрушения – чистый скол.

Полученные при исследовании стали 30L-1 результаты представлены на рис. 2,а, 3,б и 4. Первая T_{c1} и вторая T_{c2} критические температуры хрупкости наступают соответственно при $T = 248$ и 158 К и характеристиках $\Delta K_{eff,T_1}^{f.inv} = 17,4 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$, $\Delta K_{fcl.th,T_2} = \Delta K_{eff,T_2}^{f.inv} = 15,7 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$.

Начало хрупкого разрушения в сталях 30L-1 при $T = 158$ К и D9H при $T = 125$ К подтверждают результаты эксперимента (рис. 4), поставленного согласно методике [23].

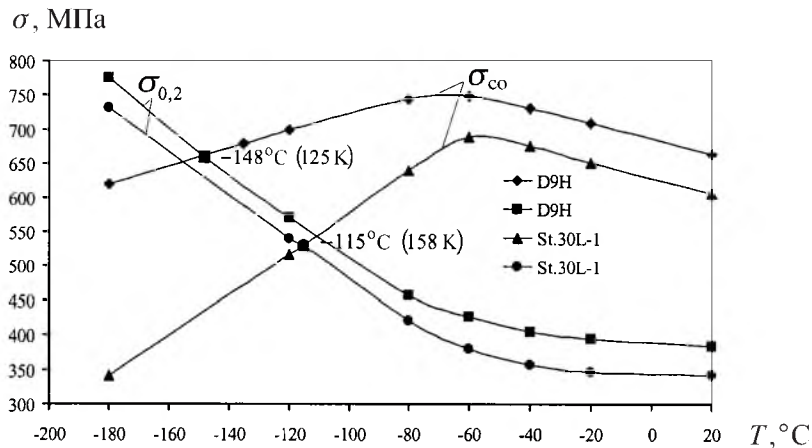


Рис. 4. Температурные зависимости условного предела текучести $\sigma_{0,2}$ и номинального разрушающего напряжения по ослабленному сечению образцов σ_{co} из исследуемых сталей.

Таким образом, границы вязкохрупкого перехода описываются критерием инвариантности эффективной кинетической диаграммы усталостного разрушения – ограниченного и текущего эффективного размаха коэффициента интенсивности напряжений,

$$\Delta K_{fcl.th,T_2} \leq \Delta K_{eff} \leq \Delta K_{eff,T_1}^{f.inv}. \quad (1)$$

Определение критических характеристик вязкохрупкого перехода в условиях многоциклового нагружения. В настоящее время экспериментальное определение критического порогового эффективного размаха КИН $\Delta K_{fcl.th,T_2}$ (нижняя граница роста усталостной макротрещины при наличии

ее закрытия, характеристика второй критической температуры хрупкости T_{c2}) при пониженных температурах с помощью описанного ранее [43, 44] метода связано с незначительными трудностями (с поверхностью образца в области вершины трещины необходимо удалять изморозь палочкой, смоченной не в этиловом спирте, а в новых продуктах нефтепереработки или жидких азоте, водороде, гелии). Кроме того, указанную характеристику можно найти экспериментально по значению порогового размаха КИН ΔK_{th} выпрямленной номинальной КДУР (рис. 2), а также по второй температуре хрупкости T_{c2} , определенной с точностью до $\pm 5^\circ\text{C}$ по методике [16, 23] (рис. 4).

Критический эффективный размах КИН потери инвариантности $\Delta K_{eff, T_1}^{f.inv}$ эффективной КДУР к различным факторам можно определить эмпирически из сопоставления в координатах $\lg da/dN - \lg \Delta K_{eff}$ скорости РУТ при характеристике $\Delta K_{eff, T_1}^{f.inv}$, полученной при комнатной ($T = 293 \text{ K}$) и низкой климатической ($T = 213 \text{ K}$) температурах. Согласно уравнению Париса [45], имеем

$$C_1(\Delta K_{eff, T_1}^{f.inv})^{n_1} = C_3(\Delta K_{eff, T_1}^{f.inv})^{n_3}. \quad (2)$$

В результате решения (2) относительно $\Delta K_{eff, T_1}^{f.inv}$ получим

$$\Delta K_{eff, T_1}^{f.inv} = \left(\frac{C_1}{C_3} \right)^{\frac{1}{n_3 - n_1}}. \quad (3)$$

Особенность эффективного размаха КИН ΔK_{eff} как локальной характеристики линейно-упругой механики разрушения. Ранее [44] установлено, что эффективный размах КИН ΔK_{eff} в цикле определяется как разность $\Delta K_{eff} = \Delta K - \Delta K_{cl}^{op}$ и при заданном номинальном размахе КИН ΔK зависит от характеристики закрытия трещины ΔK_{cl}^{op} .

В каждом цикле нагружения (активная часть цикла) эффективный размах КИН ΔK_{eff} стимулирует скорость роста длинной (больше размера зерна поликристаллического материала) усталостной трещины (макротрещины), а закрытие трещины, определяемое величиной ΔK_{cl}^{op} , сопротивляется росту усталостной трещины. Такое свойство указанных характеристик материала наблюдается при отдельном (комплексном) воздействии различных факторов.

Скорость роста усталостной макротрещины da/dN во времени (изменение величины воздействующего фактора) зависит от эффективного размаха КИН ΔK_{eff} при различных факторах и записывается в координатах $\lg da/dN - \lg \Delta K_{eff}$. Сопротивление усталостной макротрещины ее росту определяется характеристикой закрытия трещины ΔK_{cl}^{op} (в этом случае трещина остается неподвижной) в зависимости от номинального размаха

КИН ΔK и может быть представлено в виде функциональной зависимости $\Delta K_{cl}^{op} - \Delta K$.

Достоверно измеренное [43, 44] усилие P_{op} текущего раскрытия вершины усталостной макротрещины позволяет точно найти эффективный размах усилия P_{eff} в цикле, необходимого для роста трещины, т.е. размах усилия P_{eff} , определяющего освободившиеся упругие деформации, которые ушли на распространение трещины в цикле.

Таким образом, эффективный размах КИН ΔK_{eff} в цикле определяет освободившиеся упругие деформации, ушедшие на распространение трещины. Характеристика закрытия трещины ΔK_{cl}^{op} включает в себя остаточные сжимающие напряжения в вершине трещины, наблюдаемые в виде пластической зоны у вершины с пластическим потоком вдоль ее берегов (запас пластичности материала).

В общем зависимость $\Delta K_{cl}^{op} - \Delta K$ характеризует: запас пластичности материала (отображает механизм пластичности закрытия трещины); влияние механических механизмов закрытия трещины (учитывает их интегрально), скорости деформации, а также механических, структурных, физико-химических факторов на сопротивление росту усталостной трещины. По указанной зависимости можно измерять запас (исчерпываемый внешними факторами) циклической трещиностойкости материала, что позволяет процессу разрушения протекать одинаково, независимо, к примеру, от асимметрии цикла нагружения R в границах наличия закрытия трещины [46] и низкой температуры до критического эффективного размаха КИН потери инвариантности $\Delta K_{eff, T_1}^{f.inv}$ КДУР [40] (рис. 2, 3).

Верхней границей критерия (1) – невлиния различных внешних факторов на исследуемый материал – считается наименьшая критическая характеристика потери инвариантности $\Delta K_{eff, T_1}^{f.inv}$ КДУР, определяемая фактором, который наиболее ее понижает. В данном случае такой величиной является критический эффективный размах КИН потери инвариантности КДУР $\Delta K_{eff, T_1}^{f.inv}$ при низких температурах (рис. 2, 3).

Критерий роста усталостной макротрещины при наличии ее закрытия, $\Delta K_{fcl/th, R, T, etc.} \leq \Delta K_{eff} \leq \Delta K_{fcl, R, T, etc.}$ [40, 42], зависит от механического увеличения номинального размаха КИН ΔK , длины усталостной макротрещины (определяется КИН $K = \sigma\sqrt{\pi a} f(a/w)$) и диапазона воздействия одного внешнего фактора.

Изучение с помощью характеристики ΔK_{eff} причин и следствий возможного расширения критерия (1) позволит научно обосновать и учесть влияние различных факторов при изготовлении конструкционных материалов. Исследование трещиностойкости конструкционных материалов в максимально расширенном критерии (1) зависит только от механического увеличения номинального размаха КИН ΔK и длины трещины. При этом характеристика $\Delta K_{eff, T_1}^{f.inv}$ является одной из наиболее важных и описывает верхнюю границу критерия (1).

Критерий РУТ $\Delta K_{fcl.th,R,T,etc.} \leq \Delta K_{eff} \leq \Delta K_{fcl,R,T,etc.}$ определяет границы, в которых отсутствует влияние одного внешнего фактора в широком диапазоне его изменения. Кроме того, он указывает на нереализованные возможности эффективного размаха КИН ΔK_{eff} , начиная от величины $\Delta K_{eff,T_1}^{f.inv}$ и заканчивая его верхней границей $\Delta K_{fcl,R,T,etc.}$.

В случае если эффективный размах КИН достигает $\Delta K_{eff} \geq \Delta K_{fcl,R,T,etc.}$, то он равняется номинальному размаху КИН ΔK . При таком равенстве критерий $\Delta K_{fcl.th,R,T,etc.} \leq \Delta K_{eff} \leq \Delta K_{fcl,R,T,etc.}$ теряет свой феноменологический смысл. Конструкционный материал становится зависимым от воздействия в узком диапазоне изменения любого внешнего фактора из-за уменьшения локального сопротивления материала после достижения критического эффективного размаха КИН $\Delta K_{fcl,R,T,etc.}$ (пластический поток вдоль берегов трещины отсутствует, а пластическая зона у вершины трещины вносит меньший вклад в сопротивление разрушению [46]). По достижении величины $\Delta K_{fcl,R,T,etc.}$ трещина открыта в каждом цикле нагружения на протяжении всего цикла. Остаточные сжимающие напряжения в вершине трещины снизились, вследствие чего уменьшилась пластичность материала.

Метод текущего раскрытия вершины трещины [42–44] позволил доказать, что значения эффективного размаха КИН ΔK_{eff} являются ограниченными и текущими, т.е. формируют критерий количественной оценки кинетики роста усталостной трещины, который учитывает структурные свойства материала (структурно-чувствительная характеристика), его локальное сопротивление при воздействии различных внешних факторов, а также механическое увеличение номинального размаха КИН за счет роста усталостной трещины.

Установлена [46] взаимосвязь между структурой материала и микро- и макроскоростью роста усталостной трещины при различных асимметриях R цикла нагружения с учетом того, что в зерне размером l_z может образоваться какое-то количество m_z бороздок усталости с шагом S , т.е. $l_z = Sm_z$.

Следовательно, использование эффективного размаха КИН ΔK_{eff} позволит достоверно определить именно ту трещиностойкость, которая присуща данному материалу. В линейно-упругой механике разрушения он является локальной характеристикой при оценке кинетики роста усталостной трещины.

Выводы

1. Обоснованы и определены экспериментально, а также эмпирически критические характеристики вязкохрупкого перехода $\Delta K_{eff,T_1}^{f.inv}$ и $\Delta K_{fcl.th,T_2}$.

2. На основе данных эксперимента и теоретически (логические рассуждения о критических характеристиках вязкохрупкого перехода в хладноломких сталях) описаны границы вязкохрупкого перехода с помощью кри-

терия инвариантности эффективной КДУР (ограниченного и текущего эффективного размаха КИН, $\Delta K_{fcl.th.T_2} \leq \Delta K_{eff} \leq \Delta K_{eff.T_1}^{f.inv}$).

3. Установлено, что ограниченный и текущий эффективный размах КИН ΔK_{eff} является характеристикой локального критерия $\Delta K_{fcl.th.T_2} \leq \Delta K_{eff} \leq \Delta K_{eff.T_1}^{f.inv}$, расширение границ которого позволит повысить трещиностойкость материала, а также диапазон инвариантности эффективной КДУР к различным внешним факторам.

Резюме

На базі отриманих за багатоциклового навантаження холодноламких сталей експериментальних даних визначено критичні характеристики в'язкокрихкого переходу. За допомогою критерію інваріантності ефективної кінетичної діаграми втомного руйнування – обмеженого і поточного ефективного розмаху коефіцієнта інтенсивності напружень ($\Delta K_{fcl.th.T_2} \leq \Delta K_{eff} \leq \Delta K_{eff.T_1}^{f.inv}$) ці характеристики описують межі існування такого явища, як в'язкокрихкий перехід, а також визначають першу T_{c1} і другу T_{c2} критичні температури крихкості. Показано, що визначений методом поточного розкриття вістря тріщини ефективний розмах коефіцієнта інтенсивності напружень ΔK_{eff} є локальною характеристикою матеріалу в лінійно-пружній механіці руйнування.

1. Иоффе А. Ф., Кирпичева М. Ф., Левитская М. А. Проблема хрупкого разрушения // Журн. рус. физ.-хим. об-ва. – 1925. – 56, № 5. – С. 489 – 495.
2. Давиденков Н. Н. Избранные труды / Под ред. Г. С. Писаренко. Т. 1. Динамическая прочность и хрупкость металлов. – Киев: Наук. думка, 1981. – 704 с.
3. Yokobori T. Effect of strain rate of transition temperature of mild steel // J. Phys. Soc. Jap. – 1952. – 7, No. 1. – P. 44 – 57.
4. Hancock J. W. and Cowling M. J. Role of state of stress in crack-tip failure process // Metal. Sci. – 1980. – 14. – P. 293 – 304.
5. Curry D. A. A model for predicting the influence of warm prestressing and strain aging on the cleavage fracture toughness of ferritic steels // Ibid. – 1983. – 22. – P. 145 – 159.
6. Veremin F. M. Numerical modelling of warm prestressing effect using a damage function of cleavage fracture // Proc. Int. Conf. on Fracture (ICF5). – 1981. – 2. – P. 825 – 831.
7. Касаткин Б. С. Структура и микромеханизм хрупкого разрушения стали. – Киев: Техніка, 1964. – 348 с.
8. Погодин-Алексеев Г. И. Динамическая прочность и хрупкость металлов. – М.: Машиностроение, 1966. – 392 с.

9. *Потак Я. М.* Хрупкое разрушение стали и стальных деталей. – М.: Оборониздат, 1955. – 411 с.
10. *Иванова В. С., Гуревич С. В., Копьев И. М. и др.* Усталость и хрупкость металлических материалов. – М.: Наука, 1968. – 215 с.
11. *Chell G. G., Haigh J. R., and Vitek V.* A theory of warm pre-tressing. Experimental validation and implications for elastic-plastic failure criteria // *Int. J. Fract.* – 1981. – **17**. – P. 61 – 81.
12. *Шевандин Е. М., Разов И. А.* Хладноломкость и предельная пластичность сталей в судостроении. – Л.: Судпромгиз, 1965. – 321 с.
13. *Wallin K.* The effect of ductile tearing on cleavage fracture probability in fracture toughness testing // *Eng. Fract. Mech.* – 1989. – **32**, No. 4. – P. 526 – 531.
14. *Разрушение металлов.* – В 7 т. – М.: Мир, 1973. – Т. 6. – 496 с.
15. *Новые методы оценки сопротивления металлов хрупкому разрушению /* Под ред. Ю. Н. Работнова. – М.: Мир, 1972. – 439 с.
16. *Серенсен С. В., Махутов Н. А.* Определение критических температур хрупкости изделий из малоуглеродистой стали // *Пробл. прочности.* – 1969. – № 4. – С. 29 – 39.
17. *Серенсен С. В., Махутов Н. А.* Сопротивление хрупкому разрушению элементов конструкций // *Там же.* – 1971. – № 4. – С. 3 – 12.
18. *Красовский А. Я.* Хрупкость металлов при низких температурах. – Киев: Наук. думка, 1980. – 340 с.
19. *Махутов Н. А.* Методы определения критических температур хрупкости материалов и элементов конструкций // *Завод. лаб.* – 1981. – **47**, № 9. – С. 78 – 81.
20. *Красовский А. Я., Кашталян Ю. А., Красико В. Н.* Определение критической температуры перехода от хрупкого к вязкому разрушению по критерию соблюдения условий плоской деформации // *Там же.* – 1983. – **49**, № 9. – С. 71 – 74.
21. *Красовский А. Я.* Критическая температура хрупкости как мера трещиностойкости сталей // *Пробл. прочности.* – 1985. – № 10. – С. 89 – 95.
22. *Кашталян Ю. А., Каспрук Е. Н., Торон В. М.* Определение критической температуры перехода от вязкого разрушения к хрупкому при испытаниях сталей на трещиностойкость // *Там же.* – 1988. – № 1. – С. 7 – 11.
23. *ГОСТ 25.506-85.* Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. – Введ. 01.01.1986.
24. *Yan C. and Mai Y. W.* Effect of constraint on ductile crack growth and ductile-to-brittle transition of a carbon steel // *Int. J. Pres. Ves. & Piping.* – 1998. – **73**. – P. 167 – 173.
25. *Renevey S.* Statistical modeling of the ductile-to-brittle transition of ferritic steel // *Proc. of ECF-11: Mechanisms and Mechanics of Damage and Failure / Ed. J. Petit.* – 1996. – P. 791 – 796.

26. Марголин Б. З., Костылев В. И. Прогнозирование вязкохрупкого перехода при вязком развитии трещин в корпусных реакторных сталях // Пробл. прочности. – 1999. – № 6. – С. 5 – 22.
27. Сопротивление материалов деформированию и разрушению: В 2 т. / Под. ред. В. Т. Трощенко. – Киев: Наук. думка, 1994. – Т 2. – 702 с.
28. Писаренко Г. С., Красовский А. Я. Характеристическое расстояние как параметр структуры материала в теории разрушения // Физ.-хим. механика материалов. – 1996. – № 1. – С. 33 – 37.
29. Orowan E. Fracture and strength of solids // Rep. Prog. Phys. – 1949. – **12**. – P. 185 – 232.
30. Панасюк В. В. Предельное равновесие хрупких тел с трещинами. – Киев: Наук. думка, 1968. – 246 с.
31. Griffith A. A. The phenomena of rupture and flow in solids // Phyl. Trans. Roy. Soc. – 1920. – Ser. A. – **221**, No. 1 – P. 163 – 198.
32. Ярема С. Я., Остаи О. П., Белецкий В. М. и др. Об изменении скорости роста усталостных трещин в листах из сплавов Д16А и В95А при понижении температуры // Физ.-хим. механика материалов. – 1977. – № 2. – С. 5 – 10.
33. Механика разрушения и прочность металлов: В 4 т. / Под ред. В. В. Панасюка. – Т. 4. Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов. – Киев: Наук. думка, 1990. – 679 с.
34. Zheng X.-L. and Lu B.-T. Fatigue crack propagation in metals and low temperatures // Handbook of Fatigue Crack Propagation in Metallic Structures / Ed. A. Carpinteri. – Padova (Italy), 1994. – Vol. 2. – P. 1385 – 1412.
35. Katz Y., Bussiba A., and Mathias H. Effect of warm prestressing on fatigue crack growth curves at low temperatures // Fatigue at Low Temperatures. ASTM STP 857. – 1985. – P. 191 – 209.
36. Abalkis P. R., Harmon M. B., Hayman E. L., et al. Low temperature and loading frequency effects on crack growth and fracture toughness of 2024 and 7475 aluminum // Ibid. – P. 257 – 273.
37. Stephens R., Fatemi A., et al. Variable-amplitude fatigue crack initiation and growth of five carbon or low-alloy cast steels at room and low climatic temperatures // Ibid. – P. 293 – 321.
38. Остаи О. П., Жмур-Клименко В. Т. Рост усталостных трещин в металлах при низких температурах (обзор) // Физ.-хим. механика материалов. – 1987. – № 2. – С. 17 – 29.
39. ДСТУ 2444-94. Розрахунки та випробування на міцність. Опір втомі. Терміни та визначення. – Київ: Держстандарт України, 1994. – 71 с.
40. Пиняк И. С. Текущее значение раскрытия вершины трещины усталости как экспериментально обоснованный критерий ее роста // Пробл. прочности. – 1998. – № 1. – С. 25 – 33.
41. Котеразава Р., Мори М., Матцуи Т., Симо Д. Фрактографическое исследование распространения усталостной трещины // Теорет. основы инж. расчетов. – 1973. – № 4. – С. 7 – 18.

42. Пiняк І. С. Вплив явища закриття вістря втомної тріщини на асиметрію циклу навантаження та порого тріщиностійкості // Пробл. прочності. – 2000. – № 6. – С. 106 – 114.
43. Пiняк І. С. Методологія вивчення закономірностей поширення втомної тріщини за критерієм росту – поточним і обмеженим ефективним розмахом КІН // Вибрації в техніці і технологіях. – 2001. – № 5. – С. 50 – 53.
44. Красовський А. Я., Пiняк І. С. Метод поточного розкриття вістря тріщини в умовах циклічного навантаження // Пробл. прочності. – 2002. – № 4. – С. 12 – 27.
45. Paris P. C. and Erdogan F. A. A critical analysis of crack propagation laws // Trans. ASME. – 1963. – Ser. D. – **85**, No. 3 – P. 528 – 536.
46. Пiняк І. С. Микро- и макроскорость роста усталостной трещины в сталях и сплавах под влиянием закрытия трещины // Пробл. прочності. – 2002. – № 1. – С. 88 – 101.

Поступила 30. 10. 2000