УДК: 539.242: 666.239.12: 539.319

ДВУХПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ ПРЕДЕЛЫ ПРОЧНОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ С ТРЕЩИНАМИ РАЗНЫХ ДЛИН В УСЛОВИЯХ ВНЕЦЕНТРЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ РАСТЯГИВАЮЩИХ НАГРУЗОК

САПРЫКИН Ю.В.[1], КУЛАКОВ В.С.[1], ДУЙШЕНАЛИЕВ Т.Б.[1], КОСТИН В.В.[2]

[1]КГТУ им. И.Раззакова, г. Бишкек

[2]ООО «АвиаТехСнаб», г. Новосибирск

izvestiya@ktu.aknet.kg

Из анализа моделей распределения напряжений в сечениях компактных образцов с краевыми трещинами при внецентренном растяжении выявлены наиболее напряженные зоны в ослабленных (нетто) сечениях и установлены двухпараметрические пределы прочности конструкционных сталей с трещинами разных длин.

Определены требования к размерам образцов, при которых применение известного параметра вязкости разрушения K_c в расчетах на прочность может быть корректным не только в области длинных, но и коротких трещин.

From the analysis of distribution models pressure in compact sections samples of a samples with regional cracks at eccentric stretching the most intense zones in weakened (net) sections are revealed and two-parametrical strength of constructional steels with different lengths cracks are established.

The requirements of the samples sizes was defined at application of a knownparametre of destruction viscosity in calculations durability can be correct not only in the field of long, but also short cracks.

Конструкционная прочность материалов в присутствии трещин или подобных им технологических концентраторов напряжений должна определяться двумя силовыми параметрами: критической интенсивностью (или концентрацией) напряжений перед трещиной (или острым надрезом) и предельным уровнем нетто напряжения в ослабленном сечении образца (детали). В этой связи представляют интерес диаграммы предельного состояния материалов с трещинами разных длин, взаимосвязывающие критические значения коэффициента интенсивности напряжений (K_c) с номинальными разрушающими напряжениями по ослабленному (нетто) сечению - σ_{co}, при разных способах нагружения (рис.1).

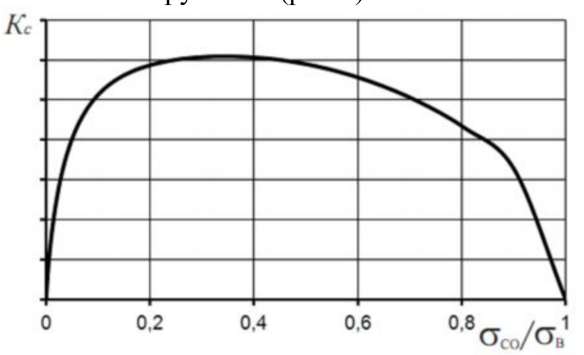

Рис.1. Типичная диаграмма предельного состояния материала с трещиной в условиях осевого растяжения (схема).

Однако, до недавнего времени подобные диаграммы для совмещенного осевого и внецентренного растяжения отсутствовали по ряду причин [1], основная из которых обусловлена тем, что σ_{co} (при данном способе нагружения) достигается не во всем нетто-сечении компактного образца, а лишь в относительно небольшой его части, названной условно «опасным сечением» (ОС) [2]. Эмпирически установлено, что размеры ОС-сечения могут изменяться пропорционально разрушающей нагрузке P_c и поэтому напряжение $\sigma_{co} = \sigma_{н*}^{(oc)}$ на границе ОС-сечения в том же образце (детали) практически постоянно и не зависит от l.

Размер ОС-сечения $r^{(oc)}$ (по линии трещины) в компактных образцах, испытывающих действие напряжений растяжения и изгиба, может быть установлен из формулы [3]:

$$\sigma_{co} = \frac{P_{c*}}{(B-l)t}\left[1 - \frac{3(B-l)}{B-l}\right] \qquad (1)$$

которую можно преобразовать к виду:

$$\sigma_{co} = \frac{P_{c*}}{[0{,}5(B-l)^2/(2B+l)]t} \qquad (2)$$

или, приняв выражение $0{,}5(B-l)^2/(2B+l)$ за параметр $r^{(oc)}$ – ОС-сечения [2], формулу (2) представим так:

$$\sigma_{co} = \sigma_{н*}^{(oc)} = \frac{P_{c*}}{r^{(oc)}t} \qquad (3)$$

здесь: $\sigma_{н*}^{(oc)}$ – предельное напряжение на границе ОС-сечения (или на расстоянии $r^{(oc)}$ от трещины); P_{c*} - максимальная нагрузка на диаграмме растяжения образца с трещиной; B и t – ширина и толщина образца соответственно.

Нагрузка P_{c*} устанавливается экспериментально. Если предельная нагрузка определяется расчетным путем (P_c), то напряжение σ_{co} ($\sigma_{н*}^{(oc)}$), в первом приближении, принимается равным пределу прочности $\sigma_в$ [3]:

$$\left\{\begin{matrix} \sigma_{co} = \sigma_{н*}^{(oc)} = \sigma_в = P_c/r^{(oc)}t \\ P_c = 0{,}5\sigma_в t[(B-l)^2/(2B+l)] \\ K_c = P_c Y/t\sqrt{B} \end{matrix}\right\} \qquad (4)$$

где: Y – корректирующая функция (l/B); для относительно небольших $l/B < 0{,}3$ функция Y уточнена в работе [1].

Так как на расстоянии $r^{(oc)}$ от трещины (граница ОС-сечения) предельное напряжение $\sigma_{co} = \sigma_{н*}^{(oc)} \cong const$ при разных l/B, то возможность установить функциональную связь параметра $\sigma_{н*}^{(oc)}$ с критическими значениями K_c, зависящими от l/B, исключена [2].

В работе [4], в качестве альтернативного критического напряжения, адекватно реагирующего на изменение P_{c*} и l, было предложено использовать напряжение $\sigma_{н*}^{(снс)}$ на границе сильно напряженной части (СНС) нетто-сечения компактного образца с краевой трещиной.

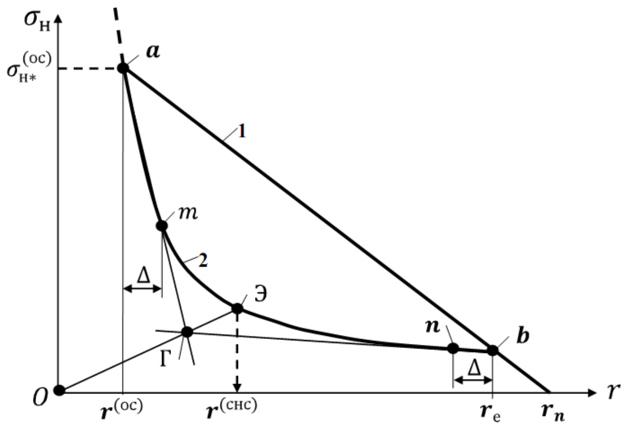

Рис.2. Иллюстрация графического способа определения размера $r^{(снс)}$ сильно напряженной части нетто-сечения (по линии трещины): 1 – распределение напряжений $\sigma_н$ согласно квазоупругой модели [2]; 2 – то же, согласно расчета по формуле (6); $r^{(oc)}$ – размер опасного сечения; r_e – расстояние от конца трещины до точки отсчета эксцентреситета нагрузки; r_n – расстояние от конца трещины до нейтральной оси.

Из анализа распределения напряжений (рис.2, кривая 2) было установлено, что при сосредоточенной растягивающей нагрузке и эксцентриситете (внецентренное растяжение) имеет место существенный градиент напряжений, в связи с чем, в нетто-сечении компактного образца с краевой трещиной можно выделить сильно и слабо напряженные части. Сильно напряженная часть (протяженностью $r^{(\text{снс})}$ от конца трещины), наиболее эффективно воспринимающая растягивающую нагрузку («эффективное» нетто-сечение), была названа СНС-сечением [2]. Знание критических значений напряжения $\sigma_{\text{н}*}^{(\text{снс})}$ на границе СНС-сечения (т.е. на расстоянии $r^{(\text{снс})}$ от конца трещины) позволяет устанавливать связь предельных значений K_c с разрушающими нагрузками P_c в широком диапазоне длин трещин в виде диаграммной кривой предельного состояния (рис.3),

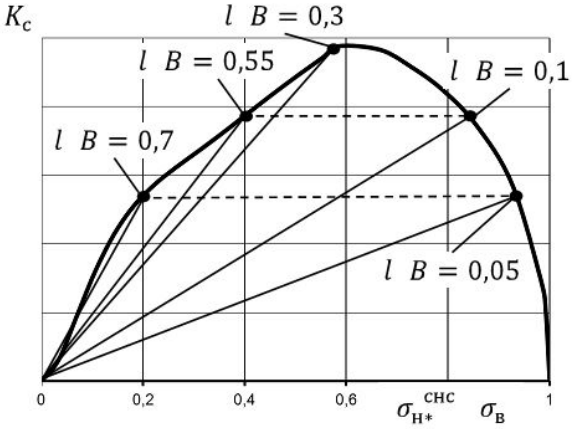

Рис.3 Типичная диаграмма предельного состояния материала с трещиной при совмещенном осевом и внецентренном растяжении.

каждая точка которой отвечает двухпараметрическому пределу прочности материала при соответствующей длине трещины. Однако, для определения $\sigma_{\text{н}*}^{(\text{снс})}$ необходимо знать характерный размер $r^{(\text{снс})}$ СНС-сечения (по линии трещины). В работе [2], с учетом модели квазиупругого распределения напряжений перед трещиной, (линия 1 на рис.2) было принято (в первом приближении), что:

$$r^{(\text{снс})} \cong 0{,}5[1/2\,(B-l)] \qquad (5)$$

где: $1/2\,(B-l)$ – расстояние r_e от конца трещины до точки отсчета эксцентриситета нагрузки (рис.2).

Более точное установление параметра $r^{(\text{снс})}$ требует анализа распределения напряжений на разных расстояниях r_i от трещины. Кривая 2 на рис.2 соответствует расчетной модели квазиупругого распределения нетто-напряжений $\sigma_{\text{н}i}$ в СНС-сечении и за его пределами:

$$\sigma_{\text{н}i} = \frac{P_{c*}}{[(k_\beta (B-l)^2/(2B+l)) + \Delta_r]t} = \frac{P_{c*}}{(r^{(\text{ос})} + \Delta_r)t} \qquad (6)$$

здесь, в соответствии с (2), выражение $k_\beta (B-l)^2/(2B+l)$ определяет характерный размер $r^{(\text{ос})}$ ОС-сечения; k_β – безразмерный коэффициент, корректирующий параметр $r^{(\text{ос})}$ [5]; $(r^{(\text{ос})} + \Delta_r)$ – расстояние r_i от конца трещины до точки «i» нетто-сечения, в которой при нагрузке $P_{c*} = const$ уровень напряжений отвечает $\sigma_{\text{н}i} < \sigma_{\text{н}*}^{(\text{ос})}$; Δ_r – расстояние между точками, удаленными на r_i и $r^{(\text{ос})}$ от конца трещины (при $r_i = r^{(\text{ос})}$, $\Delta_r = 0$).

Однако по форме кривой $\sigma_{\text{н}i} = f(r_i)$ (рис.2, кривая 2)визуально установить точку (границу), разделяющую СНС-сечение от слабо напряженной части нетто-сечения, невозможно. Для этого авторами предлагается графический способ определения $r^{(\text{снс})}$. Зависимость $\sigma_{\text{н}i} = f(r_i)$ ограничивается вверху точкой «а», отвечающей уровню критического напряжения $\sigma_{\text{н}*}^{(\text{ос})}$ на границе ОС-сечения, а внизу – точкой «b», расположенной на пересечении расчетной кривой (2) с прямой (1) распределения напряжений $\sigma_{\text{н}i}$ в соответствие с квазиупругой моделью [2].

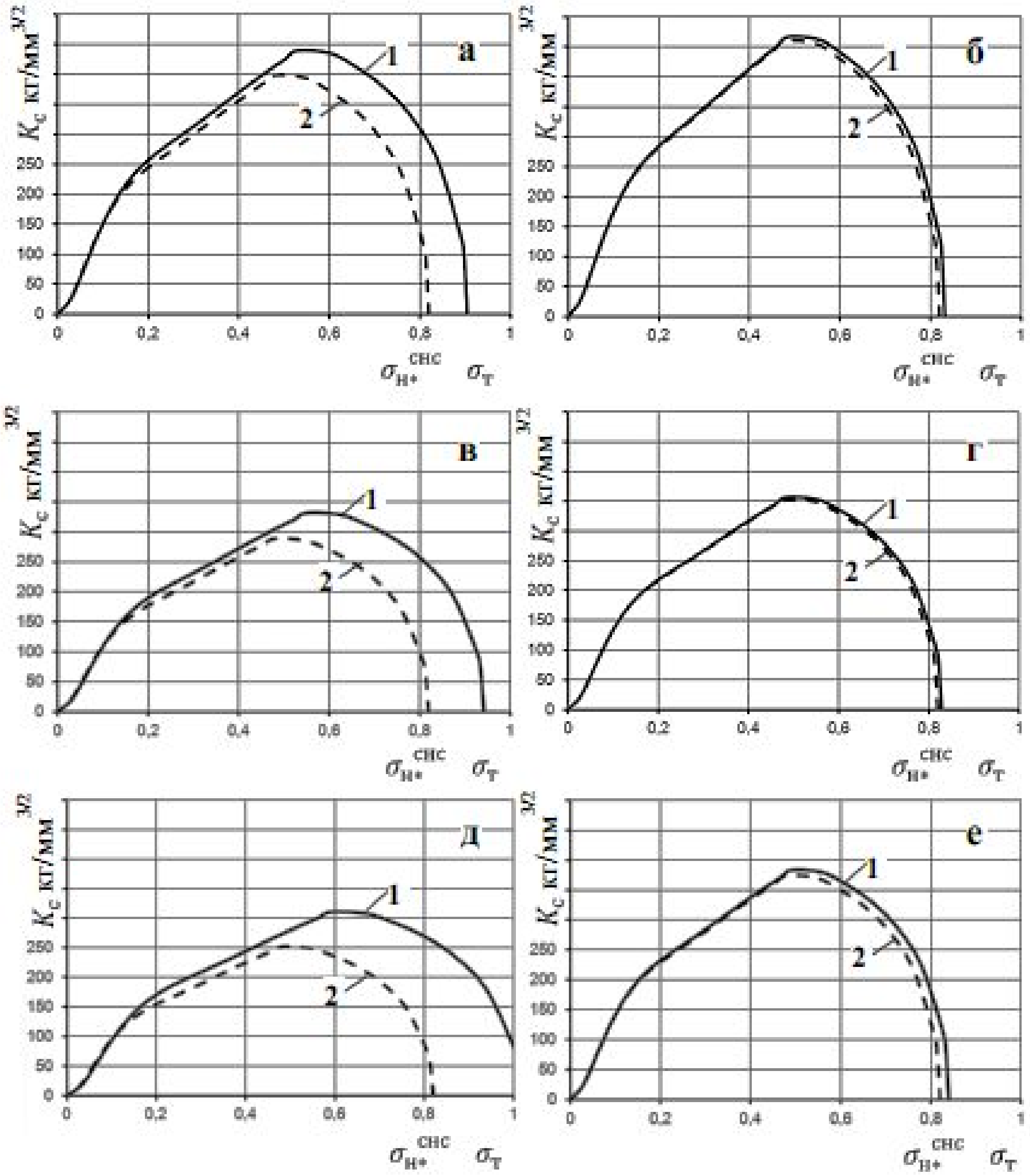

Рис.4 Сопоставление двухпараметричаских кривых (1) предельного состояния сталей 40ХН2СВА (а, б), 14Х2ГМРЮЧ (в, г), 06Г2АФ (д, е) с пороговыми кривыми (2), определяющими верхнюю границу применимости асимптотических формул линейной механики разрушения и корректности установления критических значений K_c для широкого диапазона длин трещин в компактных образцах разных размеров (B и t): а – при $B = 40$мм, $t = 20$мм;б и в - при $B = 60$мм, $t = 30$мм; г - при $B = 110$мм, $t = 55$мм; д - при $B = 128$мм, $t = 64$мм; е - при $B = 350$мм, $t = 175$мм.

При этом точка «а» должна находиться на расстоянии $r^{(oc)}$ от конца трещины, а точка «b» - на расстоянии $r_e = e - l$ (здесь e – эксцентриситет, равный $0{,}5(B - l)$ [3]). Затем ось абсцисс, на участке «$r^{(oc)} \div r_e$», делится на равные отрезки, протяженностью $\Delta \leq 1$мм, и из каждой точки проводятся вертикали до пересечения с кривой *2*. Аппроксимируя крайние отрезки «am» и «bn» этой кривой прямыми линиями, продолженными до взаимного пересечения, можно получить точку «Г», которая условно принимается за точку гипотетически допускаемого предельного изгиба кривой *2*. Из начала координат через точку «Г» проводим луч «ОГ» до пересечения с кривой *2* в точке «Э» (рис.2), проекция которой на ось «ОХ» позволяет установить параметр $r^{(снс)}$, близко совпадающий (расхождение менее 10%) с расчетной величиной $r_*^{(снс)}$, устанавливаемой по формуле (5), в которую вместо постоянного числа «0,5» введен корректирующий коэффициент k_β [5]:

$$r_*^{(снс)} = k_\beta[1/2(B - l)] \qquad (5')$$

Как следует из анализа формы диаграммной кривой предельного состояния, связывающей критические значения двух силовых параметров K_c и $\sigma_н^{(снс)}$в широком диапазоне длин трещин при внецентренном растяжении (рис.3), одни и те же критические K_c могут иметь место при относительно больших ($l/B > 0{,}3$) и небольших ($l/B < 0{,}3$) длинах трещин. Например, близкие значения K_c соответствуютl/Bравным: 0,7 и 0,05; 0,55 и 0,1 и т.д. (рис.3).

Такие совпадения иногда возможны потому, что параметр K_c, как известно, определяется длиной трещины l_i и величиной разрушающей нагрузки P_c, функционально зависящей от l [6]: чем меньше l, тем больше нагрузка P_c, при которой может быть достигнут тот же уровень K_c:

$$K_c = P_c F(l)^{1/2}$$

Левая часть куполообразной кривой на рис.3, представляет интерес в основном лишь для сравнительной оценки материалов по чувствительности к трещинам относительно больших длин ($0{,}4 \leq l/B \leq 0{,}7$) при которых только и возможно реализовать (в образцах достаточных размеров) «хрупкие» скачки трещин (нагрузок), с целью определения известной характеристики трещиностойкости - K_{Ic}.

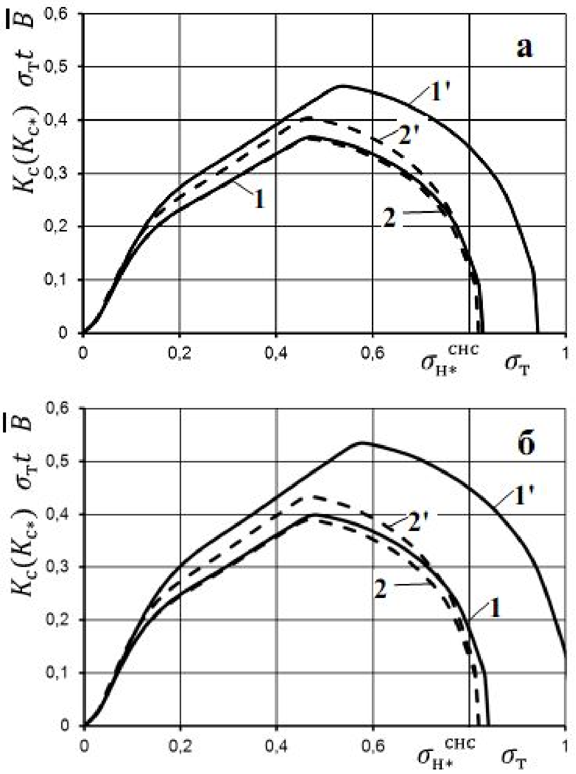

Рис.5 Двухпараметрические кривые предельного (1 и 1') и порогового (2 и 2') состояния сталей (рис.4: в, г и д, е), представленные в безразмерных координатах критических значений параметров K_c и $\sigma_{н*}^{(снс)}$, соотнесенных с пределом текучести $\sigma_т$ стали 14Х2ГМРЮЧ (а) и 06Г2АФ (б): а - при $B = 60$мм (1' и 2') и при $B = 110$мм (1 и 2); б - при $B = 128$мм (1' и 2') и при $B = 350$мм (1 и 2).

Правая часть предельной кривой на рис.3, представляет совокупность значений двухпараметрических пределов прочности материалов с трещинами относительно небольших длин ($l/B < 0{,}3$). При этом особый интерес представляет та часть предельной кривой, которая отвечает относительно коротким трещинам, длины которых ($l/B < 0,1$) наиболее соответствуют реальным размерам технологических концентраторов напряжений – надрезам, выточкам, пазам, канавкам и т.п., вблизи вершин которых могут находиться металлургические микродефекты с острыми, как у трещин, краями. Ясно, что при вскрытии перемычки (в процессе эксплуатации), отделяющей, например, дно канавки от газовой раковины микроскопического размера, технологически предусмотренная маслосъемная канавка (паз, выточка, и т.д.) может уподобиться готовой к старту трещине, длина которой будет эквивалентна совокупному размеру, включающему глубину технологического концентратора напряжений, критический размер допускаемого металлургического дефекта (d_{mk}) и минимальную толщину «перемычки», соизмеримую с d_{mk}.

В этой связи при оценке конструкционной прочности с учетом таких силовых параметров, как K_c и $\sigma_н^{(снс)}$, особое внимание следует уделять корректному установлению предельных значений коэффициента интенсивности напряжений (КИН) K_c, отвечающих относительно небольшим (коротким) трещинам, при которых предельное состояние материала в образцах недостаточно больших размеров может достигаться при напряжениях $\sigma_{н*}^{(ос)}$ превышающих предел текучести $\sigma_т$ и далее близким к пределу прочности $\sigma_в$. Дело в том, что при $\sigma_{н*}^{(ос)} > 0,82\sigma_т$ понятие «интенсивность напряжений» утрачивает смысл, так как область применения асимптотических формул линейной механики разрушения (ЛМР) перестает существовать. Однако, в механике трещин допускается и некоторая промежуточная область (по напряжениям), в которой подходы линейной и нелинейной механики разрушения могут быть применимы с некоторыми поправками [7]:

$$0,82\sigma_т < \sigma_{н*}^{(ос)} < \sigma_т$$

Вместе с тем не ясен вопрос относительно выбора образцов, размеры которых (B и t) удовлетворяли бы условию $\sigma_{н*}^{(ос)} \cong 0,82\sigma_т$ для коротких трещин ($l/B \leq 0,1$).

С целью установления достаточности размеров образцов по данному условию на поле диаграммы «$K_c = f(\sigma_{н*}^{(снс)}/\sigma_т$» (рис.3) предлагается размещать (кроме кривой предельного состояния) еще одну, подобную по форме, кривую, как границу, до которой применимы подходы ЛМР и концепция КИН. Подобные (граничные) кривые представлены на рис.4 пунктирными линиями 2. Они представляют собой совокупность предельно-достаточных значений $K_{c*} = P_{(0,82)}Y/t\sqrt{B}$ для широкого диапазона длин трещин, при которых на границах ОС-сечений достигается верхний порог (по нетто-напряжению $\sigma_н^{(ос)}$) упругопластического перехода, уточненный в работах [8]: $\sigma_н^{(ос)} = 0,82\sigma_т$. Нагрузка $P_{(0,82)}$ устанавливается из условия, что:

$$\sigma_н^{(ос)} = 0,82\sigma_т = P_{(0,82)}/r_*^{(ос)}t$$

или:

$$P_{(0,82)} = 0,82\sigma_т r_*^{(ос)}t \qquad (7)$$

где, согласно (6), $r_*^{(ос)} = k_\beta(B-l)^2/(2B+l)$.

Подставив это выражение для $r_*^{(ос)}$ в (7), получим уравнение для расчета пороговой нагрузки:

$$P_{(0,82)} = k_\beta(0,82\sigma_т)t(B-l)^2/(2B+l) \quad (7')$$

На рис.4 представлены диаграммы предельного состояния «$K_c = f(\sigma_{н*}^{(снс)}/\sigma_т$» (сплошные куполообразные кривые 1) для компактных образцов разных размеров из сталей 06Г2АФ, 14Х2ГМРЮЧ и 40ХН2СВА, испытанных в условиях внецентренного растяжения при исходных длинах усталостных трещин отвечающих интервалу $0,3 < l/B < 0,7$.

Механические свойства этих сталей представлены в табл.1.

Таблица 1

Механические свойства исследованных сталей при +20^{0}С

Сталь	$\sigma_{0,2}$ МПа	$\sigma_в$ МПа	δ %	K_{Ic} кг/мм$^{3/2}$

20	264	423	37,0	275
06Г2АФ	500	600	23,5	252
14Х2ГМРЮЧ	898	962	14,5	221
40ХН2СВА	1780	1900	12,0	180

Правые части диаграммных кривых 1 для длин трещин $l/B < 0{,}3$ установлены расчетным путем по формулам (4) и (5), преобразованным к виду:

$$\left\{\begin{array}{c} \sigma_{н*}^{(ос)} = P_{c*}/r_*^{(ос)}t = P_{c*}/[k_\beta(B-l)^2/(2B+l)]t \\ \sigma_{н*}^{(снс)} = P_{c*}/r_*^{(снс)}t = P_{c*}/[k_\beta 1/2(B-l)]t \\ P_{c*} = \lambda\sigma_в t[(B-l)^2/(2B+l)] \\ K_c = P_{c*}Y/t\sqrt{B} \end{array}\right\} \quad (8)$$

здесь безразмерные коэффициенты λ и k_β корректируют, соответственно, разрушающую нагрузку P_{c*} и параметры $r_*^{(ос)}$ и $r_*^{(снс)}$ [5].

Видно (табл.2), что значения λ и k_β могут изменяться, в зависимости от уровня прочности стали и размеров образцов в широких пределах с близкими границами.

Как видно из рис.4 увеличение ширины «B» геометрически подобных образцов способствует сближению кривых: пороговой (пунктирная кривая 2) с предельной (сплошная кривая 1). Это указывает на достаточность (или недостаточность) размера образца для корректной оценки вязкости разрушения (поK_c).

В соответствии с требованием Стандарта РФ [3], при осевом и внецентренном растяжении, а так же при изгибе, достаточными (по размерам) для установления$K_Q(K_{IC})$могут считаться плоские (дисковые) образцы, если их расчетная толщина «t_p» отвечает условию [3]:

$$t_p = \beta(K_{IC}/\sigma_т)^2 \quad (9)$$

где: β – безразмерный коэффициент, который может быть принят равным «2,5» для сталей, алюминиевых и титановых сплавов; 0,6 – для чугунов.

Таблица 2

Сопоставление параметров k_βи λ для сталей разного уровня прочности при разных размерах образцов.

Стали	σ_B МПа	B мм	k_β	λ
20	423	80	0,54	0,48
		40	0,59	0,58
06Г2АФ	60	80	0,48	0,42
		40	0,52	0,51
14Х2ГМРЮЧ	96,2	80	0,40	0,33
		40	0,44	0,41
40ХН2СВА	190	80	0,32	0,24
		40	0,35	0,3

Если по условию (9) определить «t_p» для стали 40ХН2СВА при $\beta = 2{,}5$ ($K_{IC} = 180кг/мм^{3/2}$; $\sigma_{0,2} \cong 1780МПа$), то окажется, что для корректного определения K_{IC} уже может считаться достаточным плоский образец толщиной $t_p \approx 3мм$ и шириной $B_p \approx 6мм$. Для стали 14Х2ГМРЮЧ ($K_{IC} = 221{,}3кг/мм^{3/2}$; $\sigma_{0,2} \cong 898МПа$), достаточным (по размерам) будет считаться образец толщиной $t_p \approx 15мм$ и шириной $B_p \approx 30мм$, а для низкопрочной стали 20 ($K_{IC} = 275{,}5кг/мм^{3/2}$; $\sigma_{0,2} \cong 264МПа$) расчетные размеры образца должны соответствовать $t_p \approx 270мм$ и $B_p \approx 540мм$.

Однако, как видно из рис.4 сближение кривых 1 и 2 (особенно в области коротких трещин) происходит при гораздо больших размерах t_{p*} и B_{p*} образцов, чем те, которые устанавливаются по условию (9). Эти размеры образцов (t_{p*} и B_{p*}) и должны приниматься за фактически достаточные, при которых на значительной по протяженности линии фронта коротких трещин может иметь место достаточно высокая стесненность пластической деформации при плоско-деформированном напряженном состоянии.

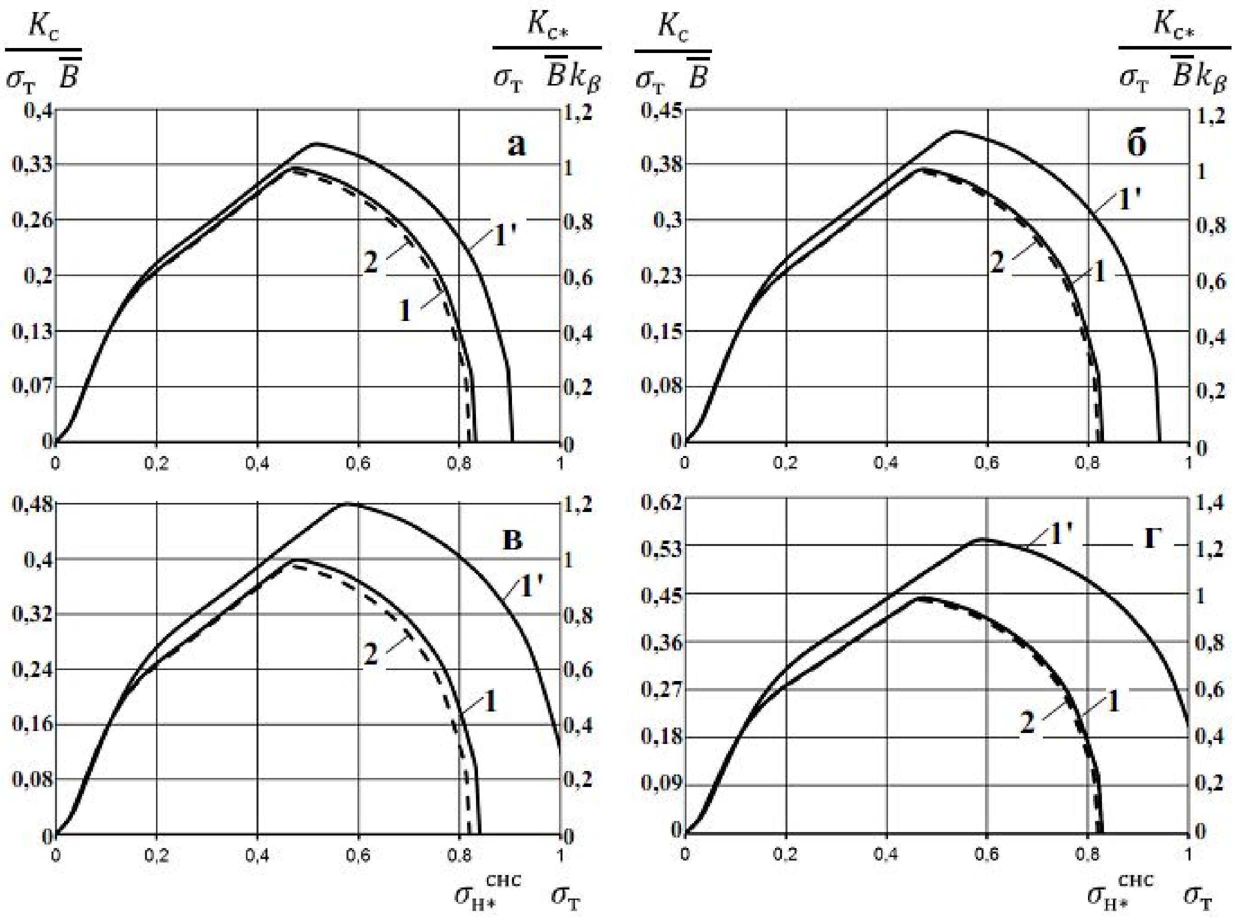

Рис.6 Сопоставление в относительных безразмерных координатах двухпараметрических кривых предельного состояния (1 и 1')конструкционных сталей с пороговыми кривыми (2) «$K_{c*}/k_{\beta}\sigma_{т}\sqrt{B} = f(\sigma_{н*}^{(снс)}/\sigma_{т})$», приведенными по коэффициенту k_{β}, влияющему на пороговую нагрузку $P_{(0,82)}$ при разной ширине образца B: а – сталь 40ХН2СВА, $B = 40$мм (1') и $B = 60$мм(1); б – сталь 14Х2ГМРЮЧ, $B = 60$мм (1') и $B = 110$мм (1); в – сталь 06Г2АФ, $B = 128$мм (1') и $B = 350$мм (1); г – сталь 20 (расчет), $B = 540$мм (1') и $B = 900$мм (1).

Из сопоставления кривых 1 на рис.4 (б и в), полученных соответственно для сталей 40ХН2СВА и 14Х2ГМРЮЧ при одинаковых размерах образцов ($B = 60$мм) видно, что абсолютные значенияK_cу высокопрочной стали 40ХН2СВА существенно привышают таковые для среднепрочной стали 14Х2ГМРЮЧ. Однако, как установлено в работе [8] длясредне- и высокопрочных сталей с трещинами характерно снижение удельной энергии разрушения с повышением $\sigma_т$, начиная с 800÷900Мпа. В этой связи, при сопоставлении сталей разного уровня прочности по вязкости разрушения и трещиностойкости, целесообразно соотносить абсолютные значения K_cс параметрами прочности $\sigma_т(\sigma_в)$ этих сталей и размерами (B) образцов. По существу учитывать влияние конструкционного (масштабного)фактора посредством безразмерных$K_c/\sigma_т\sqrt{B}$ (см. рис.6а и б).

На рис.5 представлены в безразмерных координатах двухпараметрические кривые 1 предельных состояний сталей разного уровня прочности. Здесь же пунктирными кривыми 2 обозначены границы области корректного применения коэффициента интенсивности напряженийK по условию $\sigma_{н}^{(ос)} \cong 0,82\sigma_{т}$. Видно, что расположение этих границ зависит от конструкционного фактора. Это указывает на необходимость дополнительного приведения K_{c*} еще и по коэффициентуk_{β}, влияющему на величину пороговой нагрузки$P_{(0,82)} = k_{\beta}(0{,}82\sigma_{т})t(B-l)^2/(2B+l)$и следовательно на K_{c*}: $P_{(0,82)} = K_{c*}t\sqrt{B}/Y$.

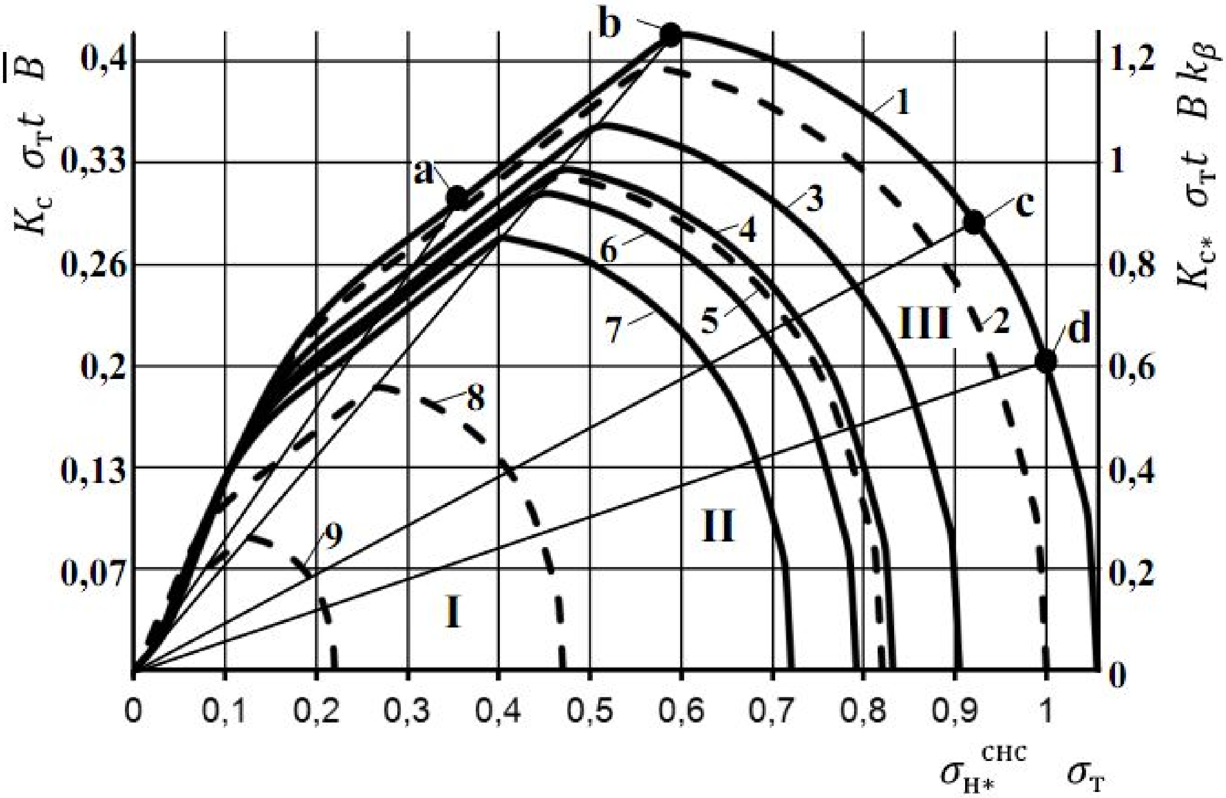

Рис.7 Расчетные спектры кривых предельного состояния (сплошные линии), как совокупности относительных двухпараметрических пределов прочности стали 40ХН2СВА в широком диапазоне длин трещин при совмещенном осевом и внецентренном растяжении геометрически подобных компактных образцов разной ширины B: 1 - $B = 6$мм; 3 -

$B = 40$мм; 4 - $B = 60$мм; 6 - $B = 80$мм; 7 - $B = 100$мм; и спектры пороговых кривых

(пунктирные линии), как границы областей отличающихся жесткостью локального напряженного состояния и чувствительностью стали к трещинам: I – квазиупругоя область (между кривыми 8 и 9); II – упругопластическая область (между кривыми 5 и 8) и III – смешанная (упругопластическая и пластическая) область (между кривыми 2 и 5); «oa», «ob», «oc» и «od» - лучи, отвечающие относительным длинам трещин l/B равным соответственно:

0,5; 0,3; 0,1; и 0,05.

На рис.6 представлены двухпараметрические диаграммы предельных состояний разных по прочности сталей. На левой и правой осях ординат здесь сопоставлены относительные (приведенные) значения параметров K_c и K_{c*} соответственно. Сплошные кривые 1 отвечают совокупности относительных безразмерных величин $K_c/t\sqrt{B}$, а пунктирные кривые 2 – относительным (пороговым) величинам $K_{c*}/t\sqrt{B}\,k_\beta$, при которых достигается граничное условие $\sigma_н^{(ос)} \cong 0{,}82\sigma_т$.

Подобные приведения силовых параметров к безразмерным величинам позволяют не только учитывать влияние конструкционных и силовых параметров на K_c и K_{c*}, но и упрощают качественно-количественный (сравнительный) анализ сопротивления разных материалов разрушению в присутствии трещин и подобных им дефектов.

Располагая двухпараметрическими диаграммами предельных состояний материалов с трещинами разных длин, можно устанавливать (на их основе) параметры, контролирующие докритические старты трещин на макро- и микроструктурных уровнях и соответственно на более низких энергетических уровнях разрушения. Спектр границ, разделяющих разные энергетические уровни поведения упругопластических тел с трещинами, предопределен еще в работе [2]. На рис.7 пунктирными кривыми изображены границы энергетических уровней, разделяющие области с разным характером поведения материала с трещинами:

<u>область I</u>– квазиупругое поведение материала с реализацией на фронте трещины плоскодеформированного напряженного состояния с максимальной стесненностью пластической деформации;

<u>область II</u> – квазиупругое и упругопластическое поведение материала при плоской деформации и высокой стесненности пластической деформации;

<u>область III</u> – пластическое поведение материала при смешанном напряженном состоянии (плоская деформация и плоско-напряженное состояние) и низкой стесненности пластической деформации в устье трещины.

Видно (рис.7), что верхний энергетический уровень (III) находится за пределами (выше) пунктирных кривых 2, представленных на рис.4-6. Эти кривые были получены из условия $\sigma_н^{(ос)} = 0{,}82\sigma_т$.Границы среднего энергетического уровня (II), согласно [9], должны отвечать условиям $\sigma_н^{(ос)} = 0{,}82\sigma_т$ (верхняя граница) и $\sigma_н^{(ос)} = 0{,}47\sigma_т$ (нижняя граница), что соответствует интервалу «упругопластического перехода» - переход от квазиупругого к упругопластическому поведению материала с трещинами в условиях плоской деформации.

Протяженность нижнего энергетического уровня (I) может быть определена из условия [2]: $0{,}22\sigma_т \le \sigma_н^{(ос)} < 0{,}47\sigma_т$

Границы каждого из выделенных энергетических уровней возможных докритических разрушений материалов в присутствии трещин можно установить из формулы (6') подстановкой в нее соответствующих граничных условий: $\sigma_н^{(ос)} = \sigma_т$; $\sigma_н^{(ос)} = 0{,}82\sigma_т$; $\sigma_н^{(ос)} = 0{,}47\sigma_т$; и $\sigma_н^{(ос)} = 0{,}22\sigma_т$.

В следующих работах авторов будут представлены результаты исследований взаимосвязей уровней прочности сталей с энергетическими уровнями докритического разрушения (старты трещин на макро- и микроуровне).

Литература

1. Сапрыкин Ю.В., Кулаков В.С. О корректности определения предела трещиностойкости при совмещенном осевом и внецентренном растяжении компактных образцов//Известия КГТУ им. И.Раззакова. 2010. №21. С.95-100.
2. Сапрыкин Ю.В. Диаграммы конструкционной прочности при совмещенном осевом и внецентренном растяжении//Известия КГТУ им. И.Раззакова. 2011. №22 С. 11-14.
3. ГОСТ 25.506-85. Определение характеристик трещиностойкости при статическомнагружении. М.: Изд. Стандартов. 1985.
4. Сапрыкин Ю.В., Кулаков В.С., Дуйшеналиев Т.Б., Костин В.В. О распределении напряжений в ослабленном сечении компактного образца с краевой трещиной при внецентренном растяжении. //Известия КГТУ им. И.Раззакова., в этом же номере (в печати).
5. Дуйшеналиев Т.Б., Кулаков В.С., Сапрыкин Ю.В., Костин В.В. Построение диаграммы предельного состояния упругопластического материала с трещинами разных длин при

совмещенном осевом и внецентренном растяжении//Труды Международной конференции «Рахматулинские чтения», Бишкек, 2011г., С. 219-224.
6. Irvin G.R. Fracture.//Handbuch der Physik. - Berlin: Springer Verlag. 1958. - Bd. 6 - p. 551-590.
7. Махутов Н.А. Сопротивление элементов конструкций хрупкому разрушению. М.: Машиностроение. 1973. 200с.
8. Сапрыкин Ю.В., Кулаков В.С., Дуйшеналиев Т.Б., Костин В.В. О вязкости и трещиностойкости упругопластических материалов// Известия КГТУ им. И.Раззакова. 2011. №23 С. 114-119.

Сапрыкин Ю.В., Дуйшеналиев Т.Б., Кулаков В.С., Жумалиев Ж.М. О трещинах и пределах трещиностойкости в механике разрушения// Известия КГТУ им. И.Раззакова. 2009. №19 С. 7-19.