

УДК: 669.141: 539.382: 531.222

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ К ОТНОСИТЕЛЬНО БОЛЬШИМ ТРЕЩИНАМ И РАЗМЕРАМ ОБРАЗЦОВ ПРИ СОСРЕДОТОЧЕННОЙ РАСТЯГИВАЮЩЕЙ НАГРУЗКЕ И ЭКСЦЕНТРИСИТЕТЕ

САПРЫКИН Ю.В.¹, ДУЙШЕНАЛИЕВ Т.Б.¹, КОСТИН В.В.², КУЛАКОВ В.С.¹¹КГТУ им. И.Раззакова²ООО «АвиаТехСнаб», г. Новосибирскizvestiya@ktu.aknet.kg

Работа посвящена исследованию влияния уровня прочности стали и размеров образцов на чувствительность к трещинам относительно больших длин при внецентренном растяжении.

This work is devote research of level influence durability of a steel and the sizes of samples on sensitivity to cracks concerning at the big lengths in eccentric stretching.

С помощью известного в линейной механике разрушения параметра K_c (K_{Ic}) – коэффициента интенсивности напряжений (КИН) можно определять разрушающие нагрузки P_c (напряжения) при допускаемых или прогнозируемых длинах трещин (дефектов) в материалах.

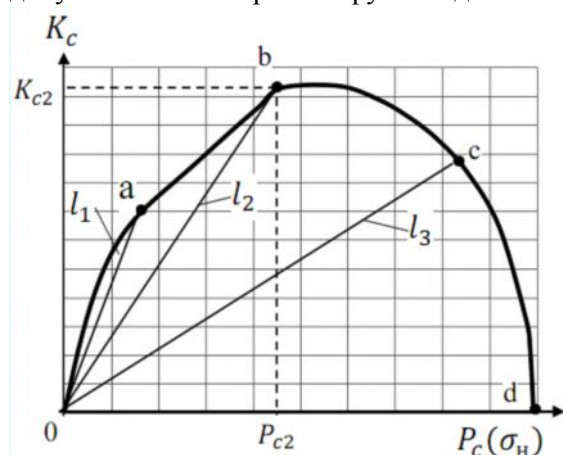


Рис.1. Схема предельной (диаграммной) кривой, взаимосвязывающей критические величины силовых параметров K_c и $P_c(\sigma_H)$, контролирующих предельное состояние

материала в широком диапазоне длин трещин.

На рис.1 представлена типичная для внецентренного растяжения диаграммная кривая 0abcd, взаимосвязывающая три основных параметра предельного состояния материала с трещиной: K_c , $P_c(\sigma_H)$, и длину трещины l , которой отвечает соответствующий луч (например 0b) на рис.1.

Видно, что проекция любой точки диаграммной кривой на ось абсцисс позволяет прогнозировать критическую нагрузку P_c при известной длине трещины или устанавливать критический размер трещины (дефекта) в материале по нагрузке P_c .

Левая часть предельной кривой - (0ab, рис.1), отвечающая условиям внецентренного растяжения и относительно большим длинам (l) трещин ($0,3 < l/B \leq 0,7$; где B – ширина образца) имеет прямолинейный участок «ab», отражающий характер изменения критической интенсивности напряжений (K_c), в указанном интервале значений l/B . Видно, что с увеличением l/B значения параметра K_c уменьшаются с K_c^{max} при $l/B = 0,3$ (т. «b») до K_c^{min} при $l/B = 0,7$ (т. «a») по прямой «ab».

Очевидно, что при относительно больших трещинах снижение K_c с ростом l/B может быть следствием как недостаточности нетто-сечения, так и влияния длины трещины на вязкость и сопротивляемость материала разрушению.

Однако преобладающее влияние ограниченного нетто-сечения на K_c явно наблюдается лишь при предельно больших длинах трещин ($l/B > 0,7$), на участке «oa» кривой диаграммы (рис.1, 2), который отличается от предыдущего «ab» большей крутизной.

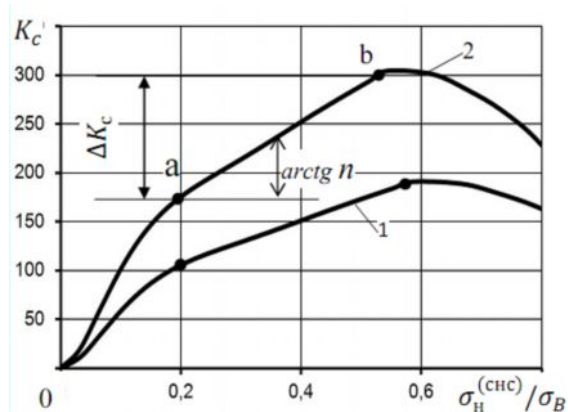


Рис.2. Сопоставление кривых предельного состояния стали 20 (1) и 14Х2ГМРЮЧ (2) с трещинами относительно больших длин ($0,3 \leq l/B \leq 0,7$) (ширина компактных образцов $B = 40$).

Допуская, что крутизна отрезков «ab» предельных кривых «0abcd» (рис.1, 2) в диапазоне относительно больших длин трещин может зависеть и от чувствительности материалов к таким трещинам, авторы определили основную цель данной работы – исследовать влияние на относительную крутизну отрезков «ab» диаграмм предельного состояния размеров образцов и уровня прочности конструкционной стали.

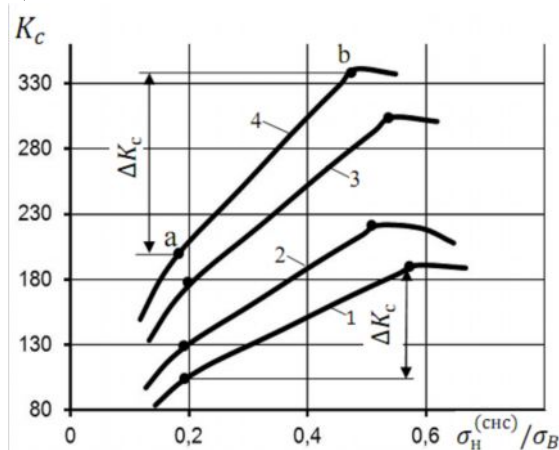


Рис.3. Участки «ab» кривых предельного состояния сталей (компактные образцы шириной $B = 40$ мм (1, 3) и $B = 80$ мм (2, 4) с трещинами относительно больших длин

$l/B = 0,3 \div 0,7$): 1, 2 – сталь 20 ($\sigma_B = 423$ МПа); 3, 4 – 14Х2ГМРЮЧ ($\sigma_B = 962$ МПа).

Исследования были выполнены на геометрически подобных призматических (компактных) образцах шириной $B = 40$ мм и $B = 80$ мм из сталей 20 и 14Х2ГМРЮЧ в условиях внецентренного растяжения при относительных длинах исходных усталостных трещин $0,3 < l/B < 0,7$.

Химический состав и механические свойства исследованных сталей представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Химический состав исследованных сталей

Марка стали	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	Cu	B	Al	Ge
20	0,21	0,3	0,5	0,027	0,03	-	-	-	-	-	-	-
14X2ГМРЮЧ	0,19	0,75	1,2	0,011	0,012	1,4	0,14	1,0	0,15	0,008	0,28	0,015

Таблица 2

Механические свойства и трещиностойкость (K_{IC}) сталей 20 и 14X2ГМРЮЧ при +20°C

Сталь	σ_T МПа	σ_B МПа	ψ %	δ %	K_{IC} МПа*м ^{1/2}
20	264	432	65,6	37,0	84,5
14X2ГМРЮЧ	898	962	61,7	14,5	68,5

Анализ изменения протяженности интервалов $K_c^{max} + K_c^{min}$ и углов наклона участков «ab» к оси абсцисс при длинах трещин $0,3 \leq l/B \leq 0,7$ показал (рис.2), что при одинаковых по форме и ширине (B) компактных образцах для сталей разного уровня прочности абсолютные величины $\Delta K = K_c^{max} - K_c^{min}$ и углы наклона участков «ab» к оси абсцисс различные: чем выше уровень прочности стали, тем больше ΔK и крутизна «ab». При этом важно отметить, что не только относительные, но и абсолютные длины трещин, соответствующие границам рассматриваемого интервала, одни и те же, т.к. $B = const$.

Снижение K_c с уровня K_c^{max} (при $l/B = 0,3$) до K_c^{min} (при $l/B = 0,7$) на большую величину ΔK и повышение крутизны диаграмм на отрезках «ab» для сталей с более высоким σ_B явно свидетельствует о большей чувствительности таких сталей (по параметру K_c) к изменению исходной длины трещины l и разрушающей нагрузке P_c .

В этой связи представляет интерес применение эмпирического числа «n», отвечающего тангенсу угла наклона участка «ab» к оси абсцисс (рис.2), для сравнительной оценки чувствительности к трещинам сталей разного структурного класса и уровня прочности.

На рис.3 сопоставлены фрагменты диаграммных линий (только в пределах участков «ab») для сталей 20 и 14X2ГМРЮЧ, полученные расчетным путем для компактных образцов разной ширины ($B = 40\text{мм}$ и $B = 80\text{мм}$) с исходными усталостными трещинами относительно больших длин $0,3 \leq l/B \leq 0,7$. Видно, что большим значениям σ_B и « B » соответствуют и большие величины ΔK и «n». Однако такого сопоставления еще не достаточно для однозначного установления величины параметра «n», которая зависит от масштаба диаграмм (по осям координат). Для этого требуется преобразование силовых параметров конструкционной прочности

- K_c и $\sigma_H^{(снс)}$ в безразмерные величины и выражения их взаимосвязи (в виде диаграмм (рис.1, 2)) в единых по масштабу координатах.

Представить параметр K_c как и $\sigma_H^{(снс)}/\sigma_B$, безразмерной величиной, можно, например, путем приведения K_c к наименьшему из максимальных значений $K_c \rightarrow (K_c^{max})_{min}$ при $l/B = 0,3$ для одной из самых низкопрочных сталей (в нашем случае таковой является сталь 20). То есть:

$$K_{ci}/(K_c^{max})_{min} * C^{-1} \quad (1),$$

здесь K_{ci} – совокупность значений K , отвечающих интервалу относительных длин трещин $0,3 \div 0,7$; $(K_c^{max})_{min}$ – наименьшее из максимальных K_c^{max} , которое соответствует стали 20 при $l/B = 0,3$ и заданной ширине образца B ; C – постоянное число, равное 0,5.

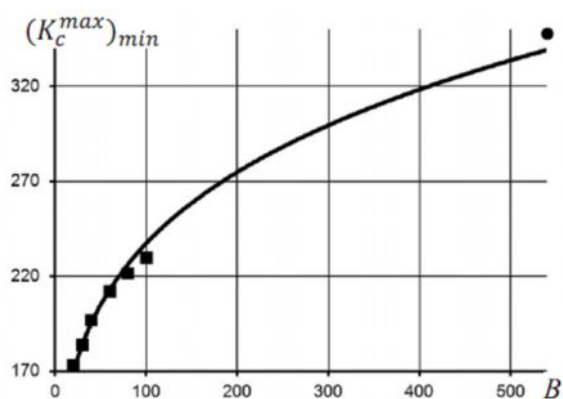


Рис.4. Расчетные (●) и экспериментальные (■) значения $(K_c^{max})_{min}$ и их зависимость от ширины «B» компактного образца стали 20 (при $l/B = 0.3$).

Зависимость $(K_c^{max})_{min}$ от ширины компактного образца B , стали 20, представлена на рис.4. Видно, что с увеличением «B» величина $(K_c^{max})_{min}$ повышается, причем наиболее интенсивно при $B < 100$.

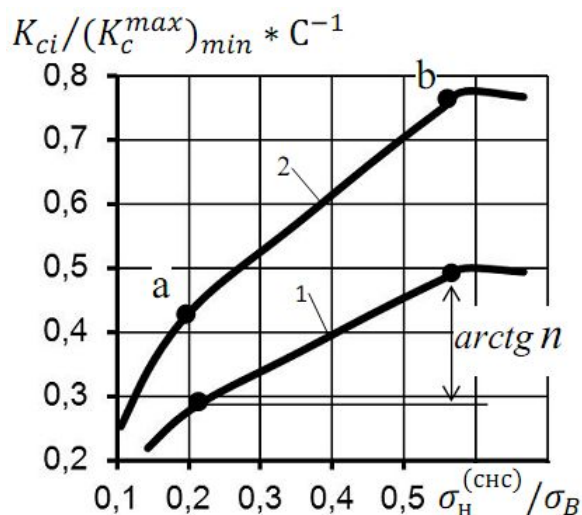


Рис.5. Участки «ab» предельных кривых для разных сталей, представленные в едином масштабе безразмерных величин параметров K_{ci} и $\sigma_n^{(снс)}$ (при $B = 40$): 1 – сталь 20 и 2 – 14X2ГМРЮЧ

На рис.5 представлены (в одном масштабе) приведенные по (1) безразмерные величины критических параметров K_{ci} для сталей 20 и 14X2ГМРЮЧ во взаимосвязи с $\sigma_n^{(снс)}/\sigma_B$. Здесь за σ_B принято максимальное разрушающее брутто-напряжение σ_c^{max} в пределах СНС – сечения при условии отсутствия в образце трещины.

Это позволяет однозначно оценить величины ΔK и «п» и исследовать характер влияния на них уровня прочности стали (σ_B). Поскольку, как отмечалось выше, изменение ΔK и «п» адекватно изменению чувствительности материала к трещине, то результаты такого исследования должны представлять интерес при сравнительной оценке по работоспособности материалов в присутствии трещин. Например, путем введения безразмерного эмпирического коэффициента $k_\tau = \Delta K_{(ab)}/\Delta\sigma_{(ab)}$ можно было бы дополнительно сопоставлять по трещиностойкости разные материалы. Здесь $\Delta K_{(ab)}$ и $\Delta\sigma_{(ab)}$ соответственно приращения безразмерных величин $K_{ci}/(K_c^{max})_{min} * C^{-1}$ и $\sigma_n^{(снс)}/\sigma_B$ в пределах участка «ab» (рис.5 и табл.1) Результаты исследований «п» для сталей с разным σ_B , представлены в таблице 3 и на рис.6. Видно, что с повышением σ_B число «п» увеличивается. Таким образом, на разных по структуре и прочности сталях, подтверждается тот факт, что с ростом σ_B чувствительность стали к трещинам возрастает. Причем в образцах больших размеров эта чувствительность выше (рис.7), что вполне объяснимо реализацией на фронте трещины более жесткого напряженного состояния.

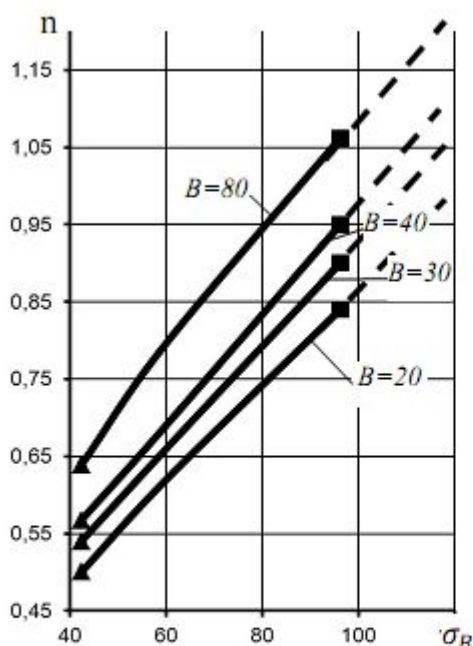


Рис.6. Зависимости числа «п» от пределов прочности (σ_B) исследованных сталей при разных размерах (B) компактных образцов: ▲ – сталь 20; ■ – 14X2ГМРЮЧ.

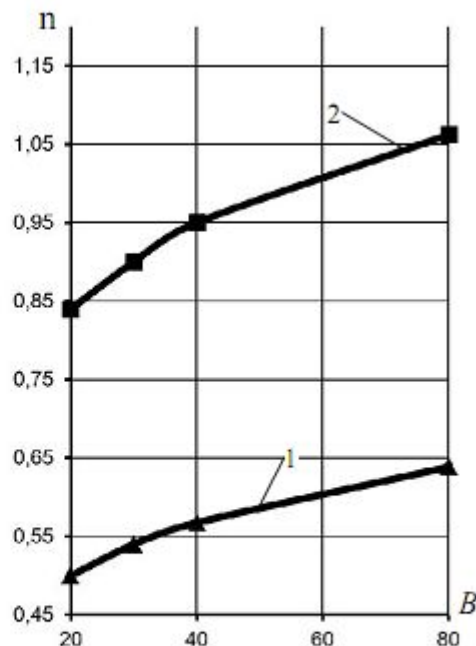


Рис.7. Зависимости числа «п» от размеров B компактных образцов для стали 20 (1) и стали 14X2ГМРЮЧ (2).

Таблица 3

Сопоставление предельных значений коэффициента интенсивности напряжений K_{ci} , установленных по уточненной стандартной формуле (3) и по эмпирической зависимости (2), а также значений параметров λ и n для сталей 20 и 14Х2ГМРЮЧ (компактные образцы шириной $B = 40$ - числитель $B = 80$ - знаменатель).

Сталь	σ_B кг/мм ²	λ	n	$\sigma_{н(0,5)}^{(снс)}$ кг/мм ² (по ф-ле (5))	$K_{c(0,5)}$ кг/мм ^{3/2} (по ф-ле (3))	$K_{c(0,5)}$ кг/мм ^{3/2} (по ф-ле (2))	Расхождения по $K_{c(0,5)}$ в %
20	423	0,585	0,563	169	150	151	1,0
		0,48	0,639	150	175	178	1,2
14Х2ГМРЮЧ	962	0,41	0,95	357	241	242	0,3
		0,325	1,062	317	270	272	0,6

Исследование взаимосвязи силовых параметров K_{ci} и $\sigma_{н(0,5)}^{(снс)}$, контролирующих разрушение, с использованием эмпирического числа « n » позволило установить следующее соотношение этих величин (см. табл.3):

$$K_{ci} = \sigma_{н(0,5)}^{(снс)} \sqrt{B/n} + \Delta, \quad (2)$$

где B – ширина компактного образца; Δ - эмпирическое число, зависящее от « n »: при $n=1$, $\Delta = 0$; при $n < 1$, $\Delta = 0,33(1 - n)$; при $n > 1$, $\Delta = -0,33(n - 1)$.

В таблице 3 представлены также критические значения $K_{c(0,5)}$, полученные по стандартной формуле [3] (для $l/B = 0,5$):

$$\left\{ \begin{array}{l} K_{c(0,5)} = P_{c*} t \sqrt{B/Y} \\ P_{c*} = \lambda \sigma_B t (B - l)^2 / (2B + l) \end{array} \right\}, \quad (3)$$

где $K_{c(0,5)}$ – критическое значение коэффициента K при относительной длине трещины $l/B = 0,5$; λ – безразмерный коэффициент, учитывающий расхождение расчетной и экспериментальной величин разрушающей нагрузки P_c (λ определялся на основе зависимостей $\lambda = f(t/B)$ установленных в [4]).

Ранее в [1] было установлено, что:

$$K_{c(0,5)} = \lambda \sigma_B \sqrt{B} \quad (4)$$

Из (2) и (4) имеем (при $l/B = 0,5$):

$$n + \Delta = \sigma_{н(0,5)}^{(снс)} / \lambda \sigma_B \quad (5)$$

Располагая эмпирическими зависимостями « n » от « B » и σ_B (рис.6, 7), а также параметра λ от « B » и « t/B » [4], можно сравнивать конструкционные стали по чувствительности к трещине (при $l/B = 0,5$) и определять критические параметры предельного состояния (K_c , $\sigma_{н(0,5)}^{(снс)}$) без проведения трудоемких механических испытаний образцов с трещинами и без построения диаграмм предельных состояний. Используя эмпирические соотношения (4) и (5) и указанные выше зависимости (рис.6, 7 и рис.1 [4]), можно устанавливать параметры, контролирующие трещиностойкость и вязкость материала:

критический параметр $K_{c(0,5)} = \lambda \sigma_B \sqrt{B}$ (4);

1. критическую величину нагрузки $P_{c(0,5)} = \frac{K_{c(0,5)} t \sqrt{B}}{Y_{(0,5)}}$ [3];
2. безразмерное число «n» (рис. 6, 7 зависимости $n = f(\sigma_B, B)$);
3. критический уровень нетто-напряжения на границе СНС-сечения [1]
- 4.

$$\sigma_{n(0,5)}^{(снс)} = K_{c(0,5)}(n + \Delta) / \sqrt{B} \quad (2)$$

$$\text{или } \sigma_{n(0,5)}^{(снс)} = (n + \Delta) \lambda \sigma_B \quad (5)$$

при достижении нагрузки уровня P_c .

5. протяженности сильно напряженной (СНС) и опасной (ОС) [1; 4] частей ослабленного трещиной сечения (соответственно $r^{(снс)}$ и $r^{(ос)}$): $\sigma_n^{(снс)} = P_c / r^{(снс)} t$ и $\sigma_n^{(ос)} = P_c / r^{(ос)} t$.
Здесь $r^{(снс)} = k_B 0.5(B - l)$ и $r^{(ос)} = k_B \beta B$ [1], где k_B – безразмерный коэффициент, корректирующий размеры (по линии трещины) ОС-сечения ($r^{(ос)}$) и СНС-сечения ($r^{(снс)}$), установленные расчетным и эмпирическим путем.
6. величину разрушающего напряжения $\sigma_{co} = \sigma_n^{(ос)} \leq \sigma_B$ на границе ОС-сечения (на расстоянии $r^{(ос)}$ от вершины трещины): $\sigma_n^{(ос)} = (\lambda / k_B) \sigma_B$ [1; 2].

Литература:

1. Сапрыкин Ю.В. Диаграммы конструкционной прочности при совмещенном осевом и внецентренном растяжении // Известия КГТУ им. И.Раззакова. 2011. №22 С. 11-14.
2. 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.
3. ГОСТ 25.506-85. Определение характеристик трещиностойкости при статическом нагружении. М.: Изд. стандартов. 1985.
4. Сапрыкин Ю.В., Кулаков В.С., Дуйшеналиев Т.Б., Костин В.В. Влияние размеров компактных образцов на чувствительность материала к трещине при внецентренном растяжении // Известия КГТУ им. И.Раззакова. 2011. №23 С. 108-113.