

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

УДК 539.4:669.017

Определение размеров трещин, соответствующих пределам выносливости металлов и сплавов при наличии концентрации напряжений

Л. А. Хамаза

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

На основе предположения о существовании пропорциональной зависимости между величиной \sqrt{area} , характеризующей размеры концентратора, и размером трещины на пределе выносливости образца с концентратором предложена методика расчета размеров такой трещины. Рассчитаны размеры нераспространяющихся трещин на пределе выносливости образцов с концентраторами напряжений для ряда конструкционных материалов с использованием предложенной методики и известных данных о пределе выносливости и дефектах различных размеров и форм, оцениваемых параметром \sqrt{area} . Рассмотрено влияние градиента и концентрации напряжений на размер трещины на пределе выносливости различных материалов. Показано, что размер трещины на пределе выносливости образцов с дефектами, во-первых, увеличивается с повышением градиента напряжений и теоретического коэффициента концентрации напряжений, во-вторых, всегда остается больше размера нераспространяющейся трещины, наблюдаемой на пределе выносливости гладкого образца.

Ключевые слова: предел выносливости, размер трещины на пределе выносливости, концентрация напряжений, градиент напряжений.

При анализе и обобщении экспериментальных данных по оценке размеров коротких трещин на пределе выносливости металлов и сплавов принципиальным является сравнение размеров трещин в гладких образцах с таковыми в образцах с концентраторами напряжений. Приведенные в литературных источниках данные ограничены и противоречивы. Например, в [1] принимается, что размеры усталостных трещин, соответствующие пределам выносливости гладких образцов и образцов с концентраторами напряжений, одинаковые, в [2–4] предполагается зависимость порогового коэффициента интенсивности напряжений для малых трещин от их размера, в [5–7] показано, что размер трещин на пределе выносливости образцов с концентраторами напряжений уменьшается с увеличением теоретического коэффициента концентрации напряжений. При этом неизученным остается вопрос: каков этот размер трещины по сравнению с ее размером на пределе выносливости гладкого образца.

В работах [4, 8–11 и др.] в предположении, что величина предела выносливости определяется согласно условиям нераспространения усталостных трещин, возникших вблизи малых дефектов, на основе учета зависимости порогового коэффициента интенсивности напряжений для малых трещин от их размера и обобщения большого объема экспериментальных данных, полученных при исследовании зависимости пределов выносливости от инициированных дефектов различных размеров и форм, предложены зависимости для порогового коэффициента интенсивности напряжений ΔK_{th} и предела выносливости σ_R , учитывающие размеры малых дефектов (трещин).

В качестве характеристики размеров дефекта принята величина квадратного корня из проекции площади дефекта или трещины на плоскость, перпендикулярную максимальным нормальным напряжениям \sqrt{area} .

На рис. 1 приведена зависимость ΔK_{th} от \sqrt{area} , полученная в работе [11] при обобщении многочисленных результатов исследования материалов при круговом изгибе и растяжении–сжатии. Значения ΔK_{th} рассчитывали по следующей зависимости:

$$\Delta K_{th} = 0,65\Delta\sigma_R \sqrt{\pi\sqrt{area}}. \quad (1)$$

В этом исследовании анализировались такие дефекты: очень маленькие засверливания диаметром 40...500 мкм и глубиной более 40 мкм [12–18], очень мелкие надрезы глубиной 5...300 мкм [19–29], очень мелкие полукруговые трещины глубиной 30...260 мкм [30], от вдавливания индентора Виккерса размером 72 мкм [13].

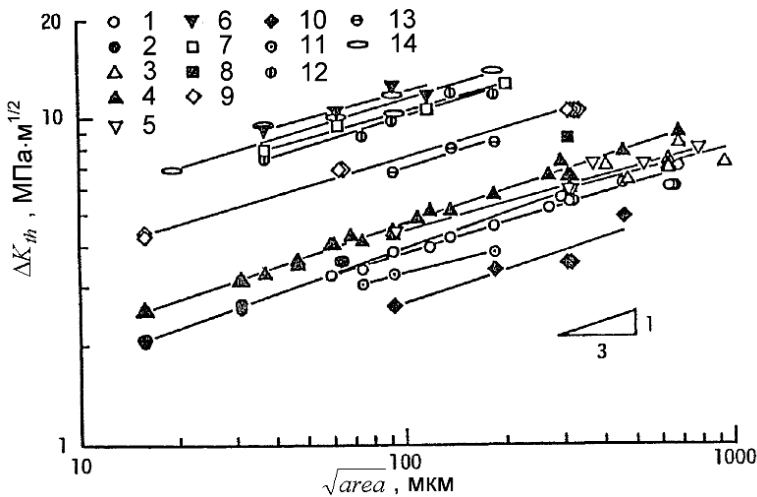


Рис. 1. Зависимость ΔK_{th} от \sqrt{area} для образцов с различными дефектами и трещинами. (Исследованные материалы (1–14) и типы дефектов приведены в табл. 1.)

Данные, приведенные на рис. 1, свидетельствуют о том, что зависимость ΔK_{th} от \sqrt{area} в области значений $\sqrt{area} \leq 1000$ мкм для исследованных материалов описывается в логарифмических координатах линейной зависимостью:

$$\Delta K_{th} \propto (\sqrt{area})^{1/3}. \quad (2)$$

Кроме того, для образцов, содержащих очень короткие плоские трещины длиной ($2a$), имеет место зависимость

$$\Delta K_{th} \propto (2a)^{1/3}. \quad (3)$$

При совместном решении уравнений (2) и (3) получим

$$\sqrt{area} \propto (2a). \quad (4)$$

В работе [4] сделан важный вывод о том, что образцы с небольшими усталостными трещинами и дефектами в виде сверлений, надрезов при одинаковом

Т а б л и ц а 1

**Исследованные материалы и типы дефектов,
оцениваемые с использованием параметра \sqrt{area}**

Материал (рис. 1)	Дефект	Материал (рис. 1)	Дефект
Сталь S10C (O) [9, 14, 17–21] (1)	Надрез Сверление	Сталь S50C (3+O) HV 319 [28, 31] (8)	Надрез
Сталь S30C (O) [22] (2)	Надрез	Сталь S50C (3+O) HV 375–378 [28, 31] (9)	»
Сталь S35C (O) [22–24] (3)	Надрез Сверление	Бронза 7/3 Brass [18, 29] (10)	Надрез Сверление
Сталь S45C (O) [9, 14, 18, 25–27] (4)	То же	Алюминиевый сплав 2017-T4 [18] (11)	Сверление
Сталь S50C (O) [28, 30] (5)	Надрез Трещина	Сталь SUS603 [4] (12)	»
Сталь S45C (3) [15, 16] (6)	Сверление	Сталь YUS170 [4] (13)	»
Сталь S45C (3+O) [15, 16] (7)	»	Мартенситная сталь [13] (14)	Индентор Надрез Сверление

Примечание. O – отжиг; 3 – закалка; 3+O – закалка + отжиг.

значении параметра \sqrt{area} имеют одинаковый предел выносливости, т.е. при одном и том же пределе выносливости

$$(\sqrt{area})_{тр} = (\sqrt{area})_{св} = (\sqrt{area})_н, \quad (5)$$

где $(\sqrt{area})_{тр}$, $(\sqrt{area})_{св}$, $(\sqrt{area})_н$ – значения для усталостных трещин, малых дефектов в виде сверлений и надрезов соответственно.

На рис. 2 по данным работы [4] построена зависимость предела выносливости σ_R от \sqrt{area} для образцов с усталостными трещинами и дефектами в виде сверлений и надрезов, подтверждающая указанный выше вывод.

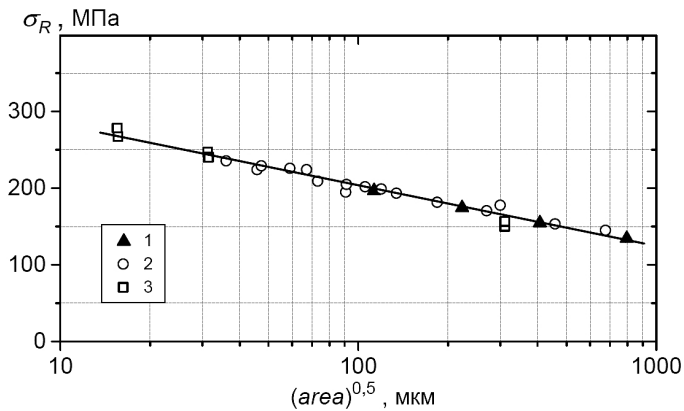
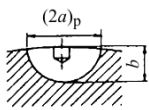
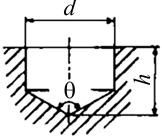


Рис. 2. Сравнение предела выносливости σ_R с величиной \sqrt{area} для образцов с небольшими усталостными трещинами и дефектами: 1 – трещина; 2 – сверление; 3 – надрез.

Сравнение пределов выносливости образцов, содержащих малые трещины и малые дефекты при одинаковых значениях \sqrt{area} (углеродистая сталь)

Трещина и сверление	\sqrt{area} , мкм	σ_R , МПа
 <p>$2a = 213$ мкм $b/a = 0,7$</p>	112	200,9
 <p>$d = 200$ мкм $h = 95$ мкм $\theta = 120^\circ$</p>	115	200,9

Обосновывают этот вывод также данные, представленные в табл. 2 [4].

Установленный выше вывод, а также пропорциональная зависимость параметра \sqrt{area} и размера трещины $(2a)$, описываемая уравнением (4), позволяют с использованием экспериментальных данных широкого круга металлов и сплавов, полученных в [4, 8–16], о пороговом коэффициенте интенсивности напряжений ΔK_{th} , пределе выносливости σ_R и дефектах различных размеров и форм, оцениваемых параметром \sqrt{area} , с одной стороны, и геометрии усталостных трещин на пределе выносливости при соответствующих условиях испытания (полукруговые, полуэллиптические и т.п.), с другой стороны, рассчитать размер нераспространяющихся трещин на пределе выносливости этих материалов. Рассмотрим некоторые примеры.

В работе [8] исследовалось влияние малых дефектов (засверливаемые отверстия диаметром и глубиной 40...200 мкм) на предел выносливости углеродистых сталей S10C и S45C при круговом изгибе образцов диаметром 10 и 6 мм соответственно. Отмечено, что при пределе выносливости, определяемом как максимальные номинальные напряжения на базе испытания 10^7 цикл, на всех образцах наблюдались нераспространяющиеся трещины (рис. 3). Размер поверхностной нераспространяющейся трещины обозначен $(2a)_с$. При испытании на усталость в условиях кругового изгиба цилиндрических образцов в них, как правило, зарождаются и развиваются трещины полуэллиптической геометрии с отношением полуосей эллипса $b/a = 0,75$ [32].

Представленные на рис. 3 данные о размерах нераспространяющихся трещин $(2a)_с$ с учетом зависимостей (4) и (5) позволяют предположить равенство величин $(\sqrt{area})_{св}$ для дефекта в виде сверления и $(\sqrt{area})_{тр}$ для поверхностной трещины размером $(2a)_п$:

$$(\sqrt{area})_{св} = (\sqrt{area})_{тр}.$$

Для полуэллиптической трещины с отношением полуосей эллипса $b/a = 0,75$ будем иметь

$$(\sqrt{area})_{св} = (\sqrt{1/2\pi(a)_п b})_{тр} = 1,0851 a_п;$$

$$(2a)_п = 1,843(\sqrt{area})_{св} = 1,843\sqrt{hd - d^2/4\sqrt{3}}.$$

Сравнение рассчитанных значений размеров трещин $(2a)_п$ с экспериментальными $(2a)_с$ (табл. 3) для всех представленных на рис. 3 случаев свидетельствует о их

Т а б л и ц а 3

Сравнение рассчитанных значений размеров трещин с экспериментальными

Углеродистая сталь	σ_R , МПа	d/h , мкм/мкм	$(2a)_э$, мкм	$(2a)_p$, мкм	$\frac{(2a)_p - (2a)_э}{(2a)_p}, \%$
0,13%С	181	40/40	58	68,2	15,0
	172	100/100	149	171,4	13,0
	147	200/200	330	340,9	3,2
0,46%С	240	40/40	58	68,2	15,0
	206	100/100	152	171,4	11,3
	191	200/200	330	340,9	3,2

Примечание. d и h – диаметр и глубина сверления.

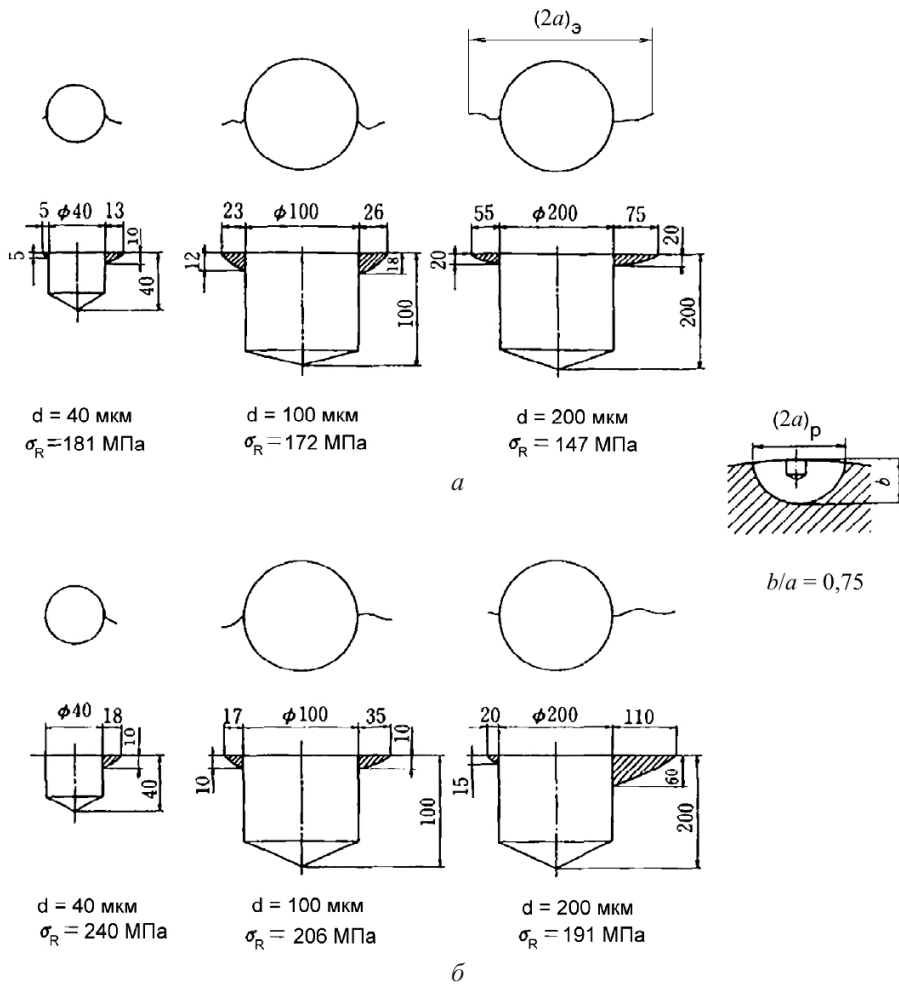


Рис. 3. Размеры нераспространяющихся трещин, исходящих из сверлений на пределе выносливости: а – сталь S10C; б – сталь S45C [8].

незначительном различии. Максимальное расхождение между этими величинами составляет не более 15%.

Следует отметить, что погрешность в определении размеров трещин $(2a)_p$, на наш взгляд, обусловлена прежде всего неопределенностью в нахождении величины b/a , особенно при малых размерах трещин ($2a \leq 0,2$ мм). Подтверждением этому могут служить, например, зависимости отношения геометрических размеров трещины b/a от длины поверхностной трещины [32] (рис. 4). Исследованная в работе [32] углеродистая сталь, содержащая 0,43%С, по своим механическим характеристикам и размерам зерен близка к рассмотренным выше материалам.

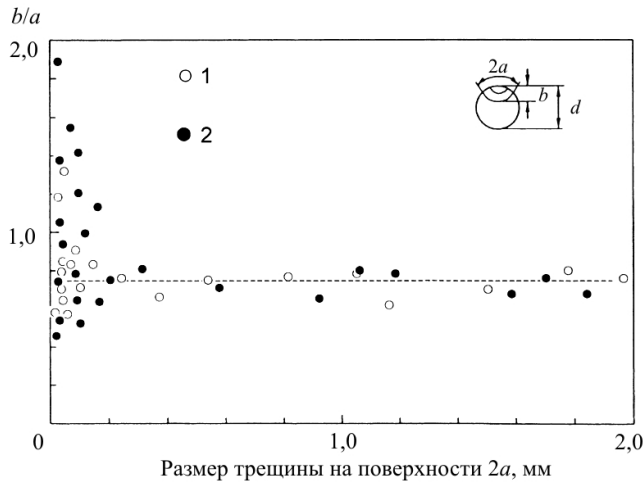


Рис. 4. Зависимость отношения геометрических размеров трещины b/a от ее длины на поверхности для мелкозернистой (1) и крупнозернистой (2) стали, содержащей 0,43С.

Как видно из рис. 4, в области размеров трещины $2a \leq 0,2$ мм наблюдается существенный разброс отношения b/a . Средняя величина b/a в интервале значений размера трещины $2a = 0 \dots 0,2$ мм составляет 0,95. С учетом этого факта погрешность в определении размеров трещин может быть уменьшена (табл. 3).

На рис. 5 с использованием данных работ [8, 9, 14] представлена зависимость пределов выносливости сталей S10C и S45C от величины \sqrt{area} и пропорционального ей размера поверхностной трещины $2a$, рассчитанного в соответствии с описанной выше методикой. Величины \sqrt{area} и $2a$ отвечают дефектам в виде сверлений с отношением $h/d = 0,5; 1,0; 2,0$; $d = 40 \dots 500$ мкм.

Приведенные на рис. 5 данные дают основание отметить следующее. Предел выносливости образцов с дефектами уменьшается с увеличением дефекта величиной \sqrt{area} и пропорционального ему размера поверхностной трещины $2a$. Предел выносливости стали S10C с дефектом величиной $\sqrt{area} = 37$ мкм ($2a = 68$ мкм), 46 мкм (85 мкм) и 60 мкм (110 мкм) равен пределу выносливости гладкого образца ($\sigma_R = 181$ МПа). Предел выносливости стали S45C с дефектом величиной $\sqrt{area} = 37$ мкм ($2a = 68$ мкм) и 46 мкм (85 мкм) отличается от предела выносливости гладкого образца ($\sigma_R = 245$ МПа) на 4,9 МПа.

Критические величины $(\sqrt{area})_c$ и $(2a)_c$ в точках пересечения горизонтальной прямой, соответствующей пределам выносливости гладкого образца, с зависимостью σ_R от \sqrt{area} ($2a$) для стали S10C равны 65 и 119 мкм, а для стали S45C – 32 и 59 мкм соответственно. Эти результаты свидетельствуют о том, что пределы выносливости указанных сталей не зависят от дефекта величиной $(\sqrt{area})_c \leq 65$ и ≤ 32 мкм и размера трещины $(2a)_c \leq 119$ и ≤ 59 мкм соответственно. Критические размеры трещин

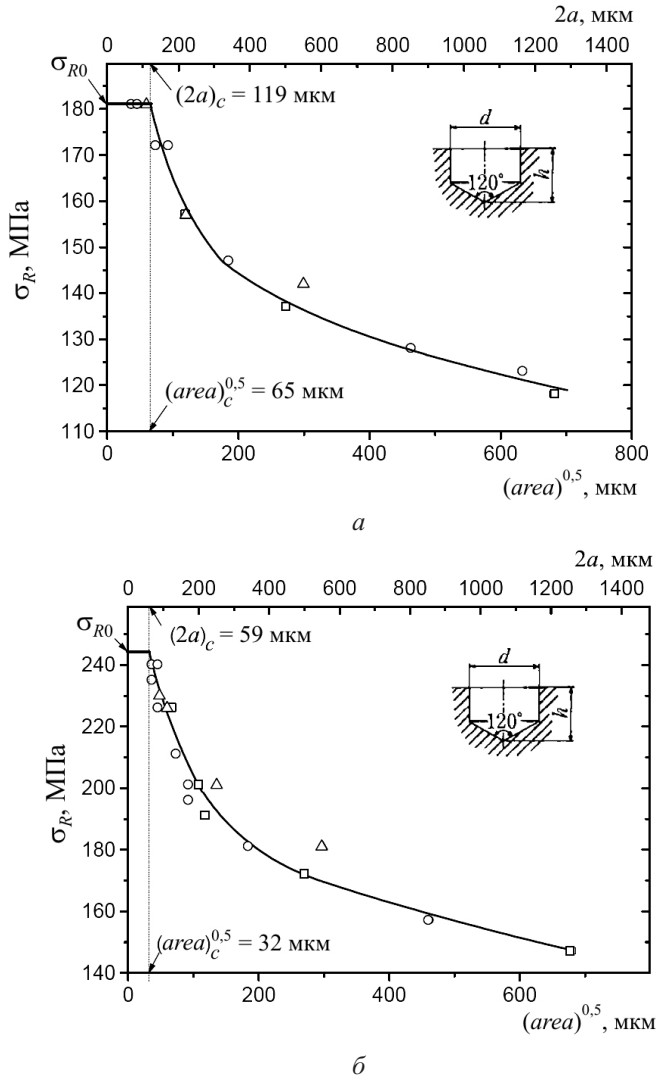


Рис. 5. Зависимость предела выносливости сталей S10C (а) и S45C (б) от величины \sqrt{area} и пропорционального ей размера поверхностной трещины $2a$: Δ – $h/d = 0,5$; \circ – $h/d = 1,0$; \square – $h/d = 2,0$. ($\sqrt{area} = \sqrt{hd - d^2/4\sqrt{3}}$, $2a = 1,843\sqrt{area}$.)

$(2a)_c$ удовлетворительно согласуются с критическими размерами нераспространяющихся трещин, наблюдаемых на пределе выносливости гладкого образца (100 мкм для стали S10C и 50 мкм для стали S45C). Таким образом, размер трещины на пределе выносливости образцов с дефектами, во-первых, уменьшается с увеличением номинальных напряжений, во-вторых, всегда остается больше размера нераспространяющейся трещины, наблюдаемой на пределе выносливости гладкого образца.

На рис. 6 с использованием результатов работ [15, 16, 18] приведено несколько подобных расчетно-экспериментальных данных для различных классов материалов. Видно, что наличие небольших дефектов (трещин) более существенно влияет на уменьшение предела выносливости высокопрочных материалов. Если для малопрочного алюминиевого сплава 2017-T4 и бронзы 70/30 критический размер нераспространяющейся трещины $(2a)_c = 110$ мкм не влияет на снижение предела выносли-

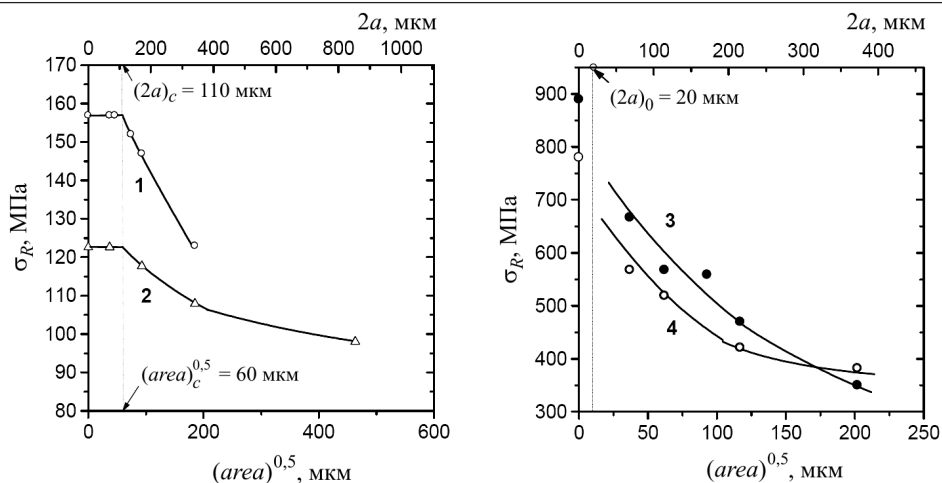


Рис. 6. Зависимость предела выносливости различных материалов от величины \sqrt{area} и пропорционального ей размера поверхностной трещины $2a$: 1 – алюминиевый сплав 2017-T4; 2 – бронза 70/30; 3 – сталь S45C (закалка); 4 – сталь S45C (закалка+отпуск). ($\sqrt{area} = \sqrt{hd - d^2 / 4\sqrt{3}}$, $2a = 1,843\sqrt{area}$.)

вости, то для высокопрочной стали S45C в закаленном состоянии такой размер трещины значительно его уменьшает. Критический размер трещины для этой стали равен 20 мкм. Данный вывод хорошо согласуется с известным фактом о том, что высокопрочные стали весьма чувствительны к надрезам и дефектам.

На рис. 7 результаты, приведенные на рис. 5 и 6, представлены в координатах предел выносливости – логарифм размера трещины, соответствующий пределу выносливости. Как видно, для всех исследованных материалов совокупность экспериментальных данных соответствует единой прямой. Это свидетельствует о том, что размер трещины на пределе выносливости образцов с дефектами, во-первых, всегда остается больше размера нераспространяющейся трещины, соответствующего пределу выносливости гладкого образца, во-вторых, уменьшается с увеличением номинальных напряжений, стремясь в пределе к размеру трещины на пределе выносливости гладкого образца.

Основываясь на вышеприведенных данных, рассмотрим влияние уровня концентрации и градиента напряжений на размер трещины, соответствующий пределу выносливости различных материалов.

В табл. 4 представлены величины теоретических коэффициентов концентрации напряжений (K_T) и относительных градиентов напряжений ($\bar{\eta}$) для концентраторов в виде засверленных отверстий с различным отношением h/d . Численные значения K_T и $\bar{\eta}$ рассчитывали методом конечных элементов с использованием программного продукта ANSYS. Приведены также размеры поверхностных трещин $(2a)_p$, соответствующие пределам выносливости различных материалов при наличии таких концентраторов.

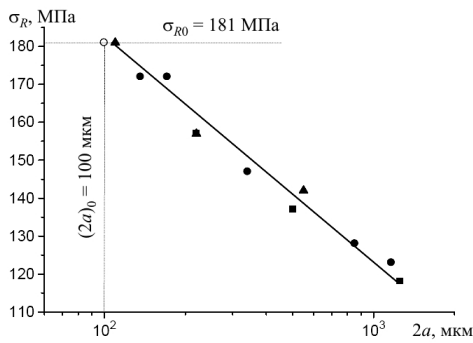
Рис. 8 иллюстрирует зависимость размера трещин на пределе выносливости стали S10C от величины относительного градиента напряжений и теоретического коэффициента концентрации напряжений при различном отношении h/d . Видно, что с уменьшением относительного градиента напряжений и теоретического коэффициента концентрации напряжений размер трещины, соответствующий пределу выносливости образцов с концентраторами напряжений, уменьшается, стремясь в пределе (при $K_T = 1$ и $\bar{\eta} = 0$) к размеру трещины на пределе выносливости гладкого образца $(2a)_0$.

Результаты, аналогичные представленным на рис. 7, 8, получены также для других материалов, исследованных в работах [4, 8–10].

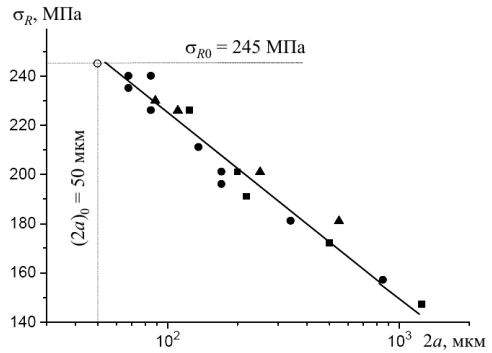
Т а б л и ц а 4

Теоретические коэффициенты концентрации напряжений, относительные градиенты напряжений и размеры трещин на пределе выносливости для концентраторов с различным отношением h/d

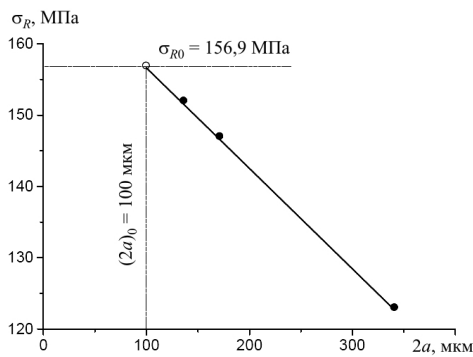
d/h , МКМ/МКМ	\sqrt{area} , МКМ	$(2a)_p$, МКМ	K_T	η
50/100	59,64	109,9	2,249	8,074
100/200	119,3	219,8	2,237	3,924
250/500	298,2	549,6	2,209	1,427
50/50	46,25	85,2	2,710	26,392
100/100	92,5	170,5	2,702	13,440
200/200	185,0	341,0	2,687	6,532
500/500	462,5	852,4	2,634	2,376
100/50	68,1	125,5	2,946	31,862
200/100	136,2	251,0	2,937	16,225
400/200	272,4	502,0	2,921	7,885
1000/500	681	1255,0	2,885	2,869



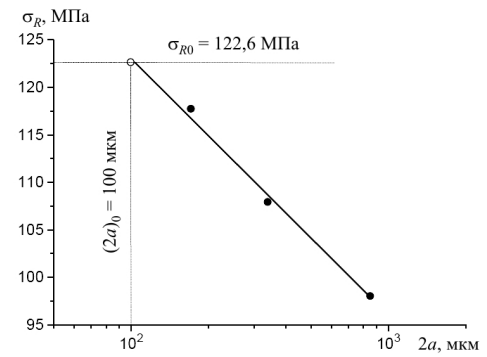
a



б



в



г

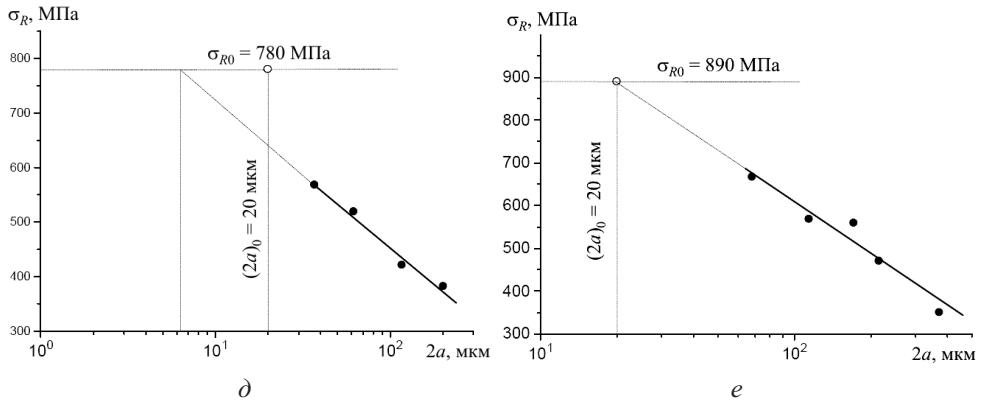


Рис. 7. Зависимость предела выносливости различных материалов от величины $2a$ для сталей S10C (а), S45C (б), бронзы 70/30 (в), алюминиевого сплава 2017-T4 (г), а также стали S45C в закаленном состоянии (д) и в состоянии закалка+отпуск (е): \blacktriangle – $h/d = 0,5$; \bullet – $h/d = 1,0$; \blacksquare – $h/d = 2,0$.

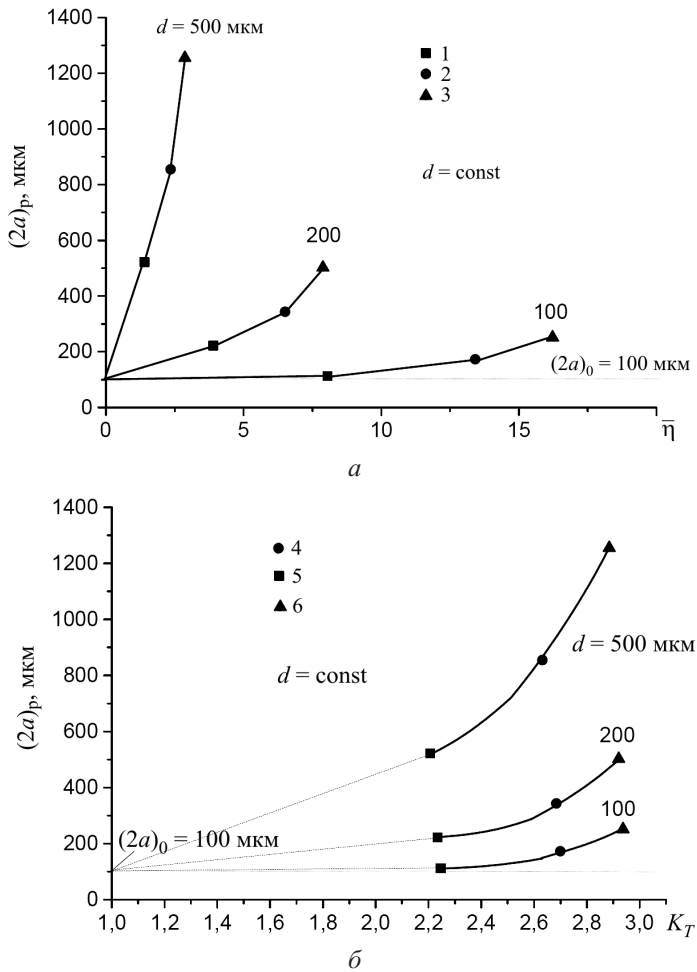


Рис. 8. Зависимость размера трещин на пределе выносливости стали S10C от величины относительного градиента напряжений (а) и теоретического коэффициента концентрации напряжений (б): 1, 4 – $h/d = 0,5$; 2, 5 – $h/d = 1$; 3, 6 – $h/d = 2$.

Выводы

1. При пределе выносливости, определяемом как максимальные номинальные напряжения на базе испытания 10^7 цикл, на всех образцах наблюдались нераспространяющиеся трещины.

2. В качестве характеристики размеров дефекта принята величина квадратного корня из проекции площади дефекта на плоскость, перпендикулярную максимальным нормальным напряжениям \sqrt{area} .

3. Установлена пропорциональная зависимость параметра \sqrt{area} от размера трещины $2a$: $\sqrt{area} \propto (2a)$.

4. Образцы с небольшими усталостными трещинами и дефектами в виде сверлений, надрезов с одинаковым значением параметра \sqrt{area} имеют одинаковый предел выносливости.

5. Предложена методика расчета размера нераспространяющихся трещин на пределе выносливости образцов с концентраторами в виде засверливаний.

С использованием экспериментальных данных широкого круга металлов и сплавов, полученных в работах Мураками, о величинах предела выносливости σ_R и дефектах различных размеров и форм, оцениваемых параметром \sqrt{area} , с одной стороны, и геометрии усталостных трещин на пределе выносливости при соответствующих условиях испытания (полукруговые, полуэллиптические и т.п.), с другой стороны, рассчитаны размеры нераспространяющихся трещин на пределе выносливости этих материалов.

6. Рассмотрено влияние уровня концентрации и градиента напряжений на размер трещины на пределе выносливости различных материалов.

7. Показано, что размер трещины на пределе выносливости образцов с дефектами, во-первых, уменьшается с увеличением номинальных напряжений и, во-вторых, всегда больше размера нераспространяющейся трещины на пределе выносливости гладкого образца.

8. Установлено, что с уменьшением относительного градиента напряжений и теоретического коэффициента концентрации напряжений размер трещины, соответствующий пределу выносливости образцов с концентраторами напряжений в виде засверливания, уменьшается, стремясь в пределе (при $K_T = 1$ и $\bar{\eta} = 0$) к размеру трещины на пределе выносливости гладкого образца.

Резюме

На основі припущення про існування пропорційної залежності між величиною \sqrt{area} , що характеризує розміри концентратора, і розміром тріщини на границі витривалості зразка з концентратором запропоновано методику розрахунку такої тріщини. Розраховано розміри нерозповсюджуваних тріщин на границі витривалості зразків із концентраторами напружень для ряду конструкційних матеріалів із використанням запропонованої методики та відомих даних щодо величин границі витривалості і дефектів різних розмірів і форм, що оцінюються параметром \sqrt{area} . Розглянуто вплив градієнта і концентрації напружень на розмір тріщин на границі витривалості різних матеріалів. Показано, що розмір тріщини на границі витривалості зразків із дефектами, по-перше, збільшується з підвищенням відносного градієнта напружень та теоретичного коефіцієнта концентрації напружень, по-друге, завжди залишається більшим за розмір нерозповсюджуваної тріщини, яка має місце на границі витривалості гладкого зразка.

1. Lukáš P., Kunz L., Weiss B., and Stickler R. Non-damaging notches in fatigue. *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* 1986. **9**, No. 3. P. 195–204.

2. Kobayashi H. and Nakazawa H. A stress criterion for fatigue crack propagation in metals. Proc. of the Int. Conf. on Mechanical Behaviour of Materials (Aug. 15–20 1971, Kyoto, Japan). Kyoto, 1971. **2**. P. 199–208.
3. Kitagawa H. and Takahashi S. Applicability of fracture mechanics to very small cracks, or the cracks in the early stage. Proc. of the Second Int. Conf. on Mechanical Behaviour of Materials. Boston. MA. 1976. P. 627–631.
4. Murakami Y. Metal Fatigue: Effect of Small Defects and Nonmetallic Inclusions. Amsterdam: Elsevier. 2003. 369 p.
5. Shang D. G., Yao W. X., and Wang D. J. A new approach to the determination of fatigue crack initiation size. *Int. J. Fatigue*. 1998. **20**, No. 9. P. 683–687.
6. Makkonen M. Statistical size effect in the fatigue limit of steel. *Int. J. Fatigue*. 2001. **23**, No. 5. P. 395–402.
7. Makkonen M. Notch size effects in the fatigue limit of steel. *Int. J. Fatigue*. 2003. **25**, No. 1. P. 17–26.
8. Murakami Y. and Endo T. Effects of small defects on the fatigue strength of metals. *Int. J. Fatigue*. 1980. **2**. P. 23–30.
9. Murakami Y. and Endo M. Quantitative evaluation of fatigue strength of metals containing various small defects or cracks. *Eng. Fract. Mech.* 1983. **17**, No. 1. P. 1–15.
10. Murakami Y., Tazunoki Y., and Endo T. Existence of coaxing effect and effects of small artificial holes on fatigue strength of an aluminum alloy and 70-30 brass. *Metall. Trans. A*. 1984. **15A**. P. 2029–2038.
11. Murakami Y. and Endo M. Effects of hardness and crack geometry on ΔK_{th} of small cracks emanating from small defects. Eds. K. J. Miller and E. R. De los Rios. The Behaviour of Short Fatigue Cracks, EGF 1. Mechanical Engineering Publications. 1986. P. 275–293.
12. Murakami Y. and Endo M. A geometrical parameter for the quantitative estimation of the effects of small defects on fatigue strength of metals. *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. Ser. A*. 1983. **49** (438). P. 127–136.
13. Murakami Y., Abe M., and Kiyota T. Effects of small defects and inclusions on fatigue strength of maraging steel. *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. Ser. A*. 1987. **53** (492). P. 1482–1491.
14. Murakami Y., Fukuda S., and Endo T. Effect of micro-hole on fatigue strength [1st Report, Effect of micro-hole dia.: 40, 50, 80, 100 and 200 μm on the fatigue strength of 0.13% and 0.46% carbon steels]. *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. Ser. I*. 1978. **44** (388). P. 4003–4013.
15. Murakami Y., Kawano H., and Endo T. Effect of micro-hole on fatigue strength [2nd Report, Effect of micro-hole of 40–200 μm in diameter on the fatigue strength of quenched or quenched and tempered 0.46% carbon steel]. *Trans. Soc. Mech. Eng. Ser. A*. 1979. **45** (400). P. 1479–1486.
16. Murakami Y. and Endo T. The effects of small defects on the fatigue strength of hard steels. Proc. of the Int. Conf. Fatigue 81. Materials Experimentation and Design. Warwick University. 1981. P. 431–440.
17. Nisitani H. and Kage M. Rotating bending fatigue of electropolished specimens with transverse holes – observation of slip bands and non-propagating cracks near the holes. *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. Ser. I*. 1973. **39** (323). P. 2005–2012.
18. Murakami Y., Tazunoki Y., and Endo T. Existence of coaxing effect and effect of small artificial holes of 40–200 μm diameter on fatigue strength in 2017S-T4 Al alloy and 7:3 brass. *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. Ser. A*. 1981. **47** (424). P. 1293–1300.

19. Ohba H., Murakami Y., and Endo T. Effects of artificial small holes on fatigue strength of notched specimens. *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. Ser. A.* 1983. **49** (444). P. 901–910.
20. Nisitani H. and Nishida S. The change of surface states and the incipient fatigue cracks in electro-polished low carbon steel (plain and notched specimens) subjected to rotating bending stress. *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. Ser. I.* 1969. **35** (280). P. 2310–2315.
21. Nisitani H. and Murakami Y. Torsional fatigue and bending fatigue of electropolished low carbon steel specimens. *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. Ser. I.* 1969. **35** (275). P. 1389–1396.
22. Nisitani H. Correlation between notch sensitivity of a material and its non-propagating crack, under rotating bending stress. Proc. of the Int. Conf. Mechanical Behaviour Material. Kyoto. II. 1972. P. 312–322.
23. Nisitani H. and Kawano K. Non-propagating crack and crack strength of shafts with a shoulder fillet subjected to rotary bending. Proc. of the 11th Japan Congress on Materials Research – Metallic Materials. Society of Materials Science. Kyoto. 1968. P. 49–51.
24. Kobayashi H. and Nakazawa H. The effects of notch depth on the initiation propagation and non-propagation of fatigue cracks. *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. Ser. I.* 1969. **35** (277). P. 1856–1863.
25. Nisitani H. and Endo M. Fatigue strength of carbon steel specimen having an extremely shallow notch. *Eng. Fract. Mech.* 1985. **21**. P. 215–227.
26. Nisitani H. and Endo M. Unifying treatment of notch effects in fatigue. *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. Ser. I.* 1985. **51**. P. 784–789.
27. Nisitani H. and Endo M. Unified treatment of deep and shallow notches in rotating bending fatigue. Eds. J. T. Fong, R. P. Wei, R. J. Fields, and R. P. Gangloff. Basic Questions in Fatigue. ASTM STP 924. 1988. P. 136–153.
28. Nisitani H. and Chishiro I. Non-propagating micro-cracks of plain specimens and fatigue notch sensitivity in annealed or heat-treated 0.5% C steel. *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. Ser. I.* 1974. **40** (329). P. 41–52.
29. Nisitani H. and Okasaka K. Effects of mean stress on fatigue strength, crack strength and notch radius at branch point under repeated axial stresses. *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. Ser. I.* 1973. **39** (317). P. 49–59.
30. Kobayashi H. and Nakazawa H. On the alternating stress required to propagate a fatigue crack in carbon steels. *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. Ser. I.* 1970. **36** (291). P. 1789–1798.
31. Murakami Y., Kawano H., and Endo T. Effect of artificial small defects on fatigue strength of metals. *J. Soc. Mater. Sci.* 1980. **29** (325). P. 988–992.
32. Zhixue W. Short fatigue crack parameters describing the lifetime of unnotched steel specimens. *Int. J. Fatigue.* 2001. **23**, No. 4. P. 363–369.

Поступила 10. 04. 2017