

2014, Izhevsk, Russia). – Ижевск: Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2014. – С. 299–301.

3. Вальнев В. А. Современные односпусковые механизмы двухствольных дробовых ружей. – Гл. 1. Классификация и особенности. – URL: http://valgun.ru/pereulok_oruzhejnikov/

Получено 06.04.2016

mehanizmy_ruzhej/odnospuskovye_mehanizmy_glava_1_istoriya.html (дата обращения: 10.01.2016).

4. Browning International S. A. Winchester Super X3 Commercial featuring Patrick Flanigan and his record 12 shots in 1,442 seconds. – URL: <http://www.youtube.com/watch?t=27&v=2t1RjviWeV4> (дата обращения: 10.01.2016).

УДК 539.374: 620.178.3

Д. С. Добровольский, магистрант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

ВЛИЯНИЕ НАДРЕЗОВ СТЕРЖНЕЙ НА КОЭФФИЦИЕНТЫ ИНТЕНСИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ КОЛЬЦЕВЫХ ТРЕЩИН

Кольцевые трещины возникают в выточках, резьбах, переходах диаметров при переменном растяжении стержней, изгибе с вращением и кручении валов, других деталей и являются причиной их разрушения. Вместе с тем исследований по механике кольцевых трещин в условиях конструктивной концентрации напряжений выполнено недостаточно. В связи с этим в данной работе предлагается инженерный метод оценки влияния кольцевых надрезов при растяжении, изгибе и кручении цилиндрических стержней с кольцевыми трещинами на коэффициенты интенсивности напряжений (КИН) с целью их использования при оценке напряженно-деформированного состояния (НДС) и трещиностойкости элементов конструкций.

При растяжении (изгибе) или кручении стержней с предельно мелкой кольцевой выточкой коэффициенты концентрации нормальных $\alpha_{p(n)}$ или касательных α_k напряжений равны [1]

$$\begin{aligned}\alpha_{p(n)} &= 1 + 2\sqrt{l/\rho}; \\ \alpha_k &= 1 + \sqrt{l/\rho},\end{aligned}\quad (1)$$

где l – глубина выточки; ρ – радиус кривизны в ее вершине.

С учетом этого можно представить КИН нормального отрыва K_{1M} и несимметричного сдвига K_{3M} при растяжении (изгибе) или кручении стержней без надрезов с предельно мелкой ($\lambda \rightarrow 0$) кольцевой трещиной ($l/\rho \rightarrow \infty$) как

$$\begin{aligned}K_{1M} &= \lim_{\rho \rightarrow \infty} (0,5\sigma_n \alpha_{p(n)} \sqrt{\pi\rho}) = \sigma_n \sqrt{\pi l}; \\ K_{3M} &= \lim_{\rho \rightarrow \infty} (\tau_n \alpha_k \sqrt{\pi\rho}) = \tau_n \sqrt{\pi l},\end{aligned}\quad (2)$$

где l и $\lambda = 2l/d$ – абсолютная и относительная глубина трещины соответственно; d – диаметр стержня без надреза; $\sigma_n = \sigma/(1-\lambda)^2$, $\sigma_n = \sigma/(1-\lambda)^3$,

$\tau_n = \tau/(1-\lambda)^3$ и σ , τ – номинальные напряжения, определяемые в нетто- и брутто-сечениях по формулам сопротивления материалов, соответственно, при растяжении, изгибе и кручении.

Для определения КИН при растяжении, изгибе или кручении стержней без надрезов с условно мелкими трещинами ($0 < \lambda \leq 0,5$) предложены формулы [2]

$$\begin{aligned}K_{1M} &= \frac{1}{1-\lambda} \sigma \sqrt{\pi l}; \\ K_{1Mi} &= \frac{1-0,5\lambda}{(1-\lambda)^2} \sigma \sqrt{\pi l}; \\ K_{3M} &= \frac{1-0,5\lambda}{(1-\lambda)^2} \tau \sqrt{\pi l}.\end{aligned}\quad (3)$$

Расчет КИН для этих же стержней с глубокими трещинами ($0,5 \leq \lambda < 1$) выполняется по полученным соотношениям

$$K_{1r} = \frac{0,5}{(1-\lambda)^2} \sqrt{\frac{1-\lambda}{\lambda}} \sigma \sqrt{\pi l};\quad (4)$$

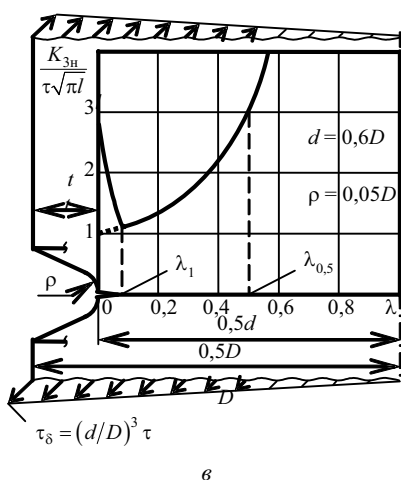
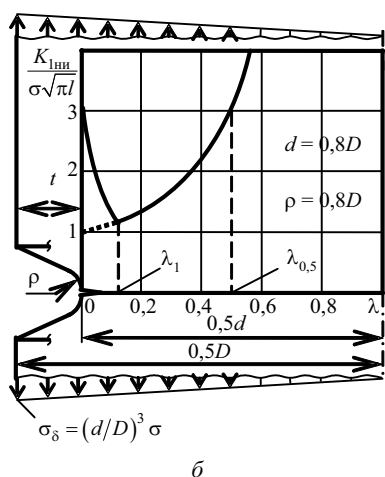
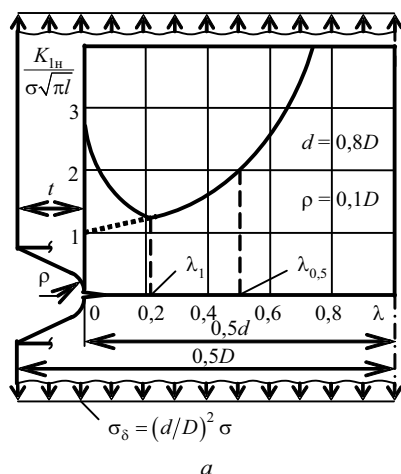
$$K_{1ri} = \frac{0,375}{(1-\lambda)^3} \sqrt{\frac{1-\lambda}{\lambda}} \sigma \sqrt{\pi l};\quad (5)$$

$$K_{3r} = \frac{0,375}{(1-\lambda)^3} \sqrt{\frac{1-\lambda}{\lambda}} \tau \sqrt{\pi l}.\quad (6)$$

Суть предлагаемого метода расчета КИН состоит в следующем. Местные напряжения, обусловленные концентрацией напряжений от наличия надреза, принимаются за номинальные напряжения для вершины трещины; надрез влияет на КИН в области нетто-сечения, где коэффициент концентрации напряжений изменяется от $\alpha_{\sigma(\tau)} > 1$ до 1; для области нетто-сечения стержней, где $\alpha_{\sigma(\tau)} < 1$, надрезы не влияют на КИН; последние вычисляются по предло-

женным для стержней без надрезов соотношениям (3)–(6).

При реализации метода использованы авторитетные конечно-элементные (КЭ) решения трех задач [3], полученные с погрешностью менее 3 %, при растяжении стержней с мелким, глубоким и промежуточным по глубине t надрезами и коэффициентами концентрации напряжений α_σ в вершине надрезов, равными 2,91; 6,60 и 3,71 (см. рис.).



Изменение КИН при растяжении (а), изгибе (б) и кручении (в) цилиндрических стержней с кольцевыми надрезами и трещинами в зависимости от относительного размера λ трещин

В результате обработки КЭ-данных и с учетом аналитических решений Г. Нейбера получены аппроксимирующие соотношения для вычисления коэффициентов концентрации напряжений в диапазоне отношения $1 \leq t/\rho \leq 4$ при растяжении, изгибе или кручении стержней:

$$\begin{aligned} \alpha_\sigma &= 1 + 1,70(t/\rho)^{0,8}; \\ \alpha_{\sigma_{\text{из}}} &= 1 + 0,70(\alpha_\sigma - 1); \\ \alpha_\tau &= 1 + 0,35(\alpha_\sigma - 1). \end{aligned} \quad (7)$$

Анализ изменения местных напряжений по сечению надрезов, описываемых громоздкими решениями Г. Нейбера в гиперболических координатах, позволил подобрать удобные при вычислении аппроксимирующие функции для коэффициентов концентрации напряжений в диапазоне относительной глубины трещин $0 \leq \lambda \leq \lambda_1$ при растяжении, изгибе или кручении:

$$\alpha_{\sigma\lambda} = 1 + \left[1 - (\lambda/\lambda_1)^{0,40}\right](\alpha_\sigma - 1); \quad (8)$$

$$\alpha_{\sigma_{\text{из}}\lambda} = 1 + \left[1 - (\lambda/\lambda_1)^{0,56}\right](\alpha_{\sigma_{\text{из}}} - 1); \quad (9)$$

$$\alpha_{\tau\lambda} = 1 + \left[1 - (\lambda/\lambda_1)^{0,56}\right](\alpha_\tau - 1), \quad (10)$$

где величины $\lambda_1 = 0,13 + 0,60\rho/d$ и $\lambda_1 = 0,07 + 0,28\rho/d$ соответствуют значениям $\alpha_\sigma = 1$ при растяжении и $\alpha_{\sigma_{\text{из}}} = \alpha_\tau = 1$ при изгибе или кручении. Используя соотношения (8)–(10), можно представить формулы для вычисления КИН стержней с кольцевыми надрезами и трещинами в диапазоне $0 < \lambda \leq \lambda_1$:

при растяжении

$$K_{\text{IH}} = \frac{\alpha_{\sigma\lambda}}{1 - \lambda} \sigma \sqrt{\pi l}; \quad (11)$$

изгибе

$$K_{\text{IHI}} = \frac{\alpha_{\sigma_{\text{из}}\lambda} (1 - 0,5\lambda)}{(1 - \lambda)^2} \sigma \sqrt{\pi l}; \quad (12)$$

кручении

$$K_{3\text{H}} = \frac{\alpha_{\tau\lambda} (1 - 0,5\lambda)}{(1 - \lambda)^2} \tau \sqrt{\pi l}. \quad (13)$$

Для условно мелких ($\lambda_1 < \lambda \leq 0,5$) и глубоких ($0,5 \leq \lambda < 1$) трещин, когда надрезы не влияют на НДС в окрестности вершин трещин, для вычисления КИН рекомендуются формулы (3)–(6).

Примеры реализации предлагаемого метода

Пример 1. Определить изменение КИН при растяжении стержня с надрезом и трещиной в зависимости от относительной глубины λ трещины (см. рис. а).

При $\lambda \rightarrow 0$ и $t/\rho = 1$ (мелкий надрез) по формулам (7) и (11) получаем $\alpha_\sigma = 2,70$; $K_{\text{IH}} = 2,70\sigma\sqrt{\pi l}$.

Для $\rho/d = 0,125$ и $\lambda_1 = 0,13 + 0,60\rho/d = 0,205$ значение $\alpha_\sigma = 1$, а с учетом (11) $K_{1н} = 1,26\sigma\sqrt{\pi l}$. Если $\lambda = 0,5\lambda_1 = 0,102$, то по (8) и (11) находим $\alpha_{\sigma\lambda} = 1,41$ и $K_{1н} = 1,57\sigma\sqrt{\pi l}$. Для λ , равной 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7, по (3) и (4) получаем величины $K_{1н}/\sigma\sqrt{\pi l}$, соответственно, равными 1,43; 1,67; 2,00; 2,55; 3,64 (рис. а). При $\lambda \rightarrow 0$ отклонение прогнозируемого предлагаемым методом значения $K_{1н} = 2,70\sigma\sqrt{\pi l}$ от КЭ $K_{1н} = 2,91\sigma\sqrt{\pi l}$ составляет $-7,2\%$.

Пример 2. Определить изменение КИН при изгибе стержня с надрезом и трещиной в зависимости от λ (см. рис. б).

При $\lambda \rightarrow 0$ и $t/\rho = 2$ (средний по глубине надрез) по формулам (7) и (12) вычисляем $\alpha_\sigma = 3,91$, $\alpha_{\sigmaн} = 3,04$, $K_{1нн} = 3,04\sigma\sqrt{\pi l}$. Для $\rho/d = 0,125$ и $\lambda_1 = 0,07 + 0,28\rho/d = 0,105$ значение $\alpha_{\sigmaн} = 1$, а с учетом (12) $K_{1нн} = 1,18\sigma\sqrt{\pi l}$. Если $\lambda = 0,5\lambda_1 = 0,052$, то по (9) и (12) значения $\alpha_{\sigma\lambda} = 1,66$ и $K_{1нн} = 1,80\sigma\sqrt{\pi l}$. При λ , равной 0,2; 0,3; 0,4; 0,5 и 0,55, по (3) и (5) получаем значения $K_{1нн}/\sigma\sqrt{\pi l}$, соответственно, равными 1,41; 1,73; 2,22; 3,00; 3,58 (рис. б). КЭ-значение $\alpha_\sigma = 3,91$, а с учетом формул (7) и (12) находим соответствующие величины $\alpha_{\sigmaн} = 2,90$ и $K_{1нн} = 2,90\sigma\sqrt{\pi l}$. Полученное по предлагаемому методу значение $K_{1нн} = 3,04\sigma\sqrt{\pi l}$ отличается от КЭ-величины $K_{1нн} = 2,90$ на $4,8\%$.

Пример 3. Определить изменение КИН при кручении стержня с надрезом и трещиной в зависимости от λ (см. рис. в).

Получено 15.04.2016

При $\lambda = 0$ и $t/\rho = 4$ (глубокий надрез) по формулам (7), (10) и (13) вычисляем $\alpha_\sigma = 6,15$, $\alpha_\tau = 2,80$ и $K_{3н} = 2,80\tau\sqrt{\pi l}$. Для $\rho/d = 0,083$ и $\lambda_1 = 0,07 + 0,28\rho/d = 0,093$ $\alpha_\tau = 1$, а с учетом (13) значение $K_{3н} = 1,16\tau\sqrt{\pi l}$. Если $\lambda = 0,5\lambda_1 = 0,046$, то используя (10) и (13), получаем $\alpha_{\tau\lambda} = 1,58$ и $K_{3н} = 1,70\tau\sqrt{\pi l}$. При λ , равной 0,2; 0,3; 0,4; 0,5 и 0,55, по формулам (3) и (6) находим величины $K_{3н}/\tau\sqrt{\pi l}$, соответственно, 1,41; 1,73; 2,22; 3,00 и 3,58 (рис. в). При $\lambda \rightarrow 0$ КЭ-значение $\alpha_\sigma = 6,60$, а с учетом (7) и (3) вычисляем соответствующие величины $\alpha_\tau = 2,96$ и $K_{3н} = 2,96\tau\sqrt{\pi l}$. Расхождение между прогнозируемым $K_{3н} = 2,80\tau\sqrt{\pi l}$ и КЭ $K_{3н} = 2,96\tau\sqrt{\pi l}$ значениями составляет $-5,4\%$.

Пунктиром на рисунке показано изменение КИН для стержней без надрезов.

Сопоставление результатов расчета КИН по полученному и КЭ-решениям позволяет рекомендовать предлагаемый метод для использования при оценке НДС и трещиностойкости элементов конструкций.

Библиографические ссылки

1. Нейбер Г. Концентрация напряжений. – М.; Л.: Гостехиздат, 1947. – 204 с.
2. Добровольский Д. С. Коэффициенты интенсивности напряжений для цилиндрического образца с кольцевой трещиной // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2016. – № 6. – С. 57–59.
3. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений: в 2 т. – Т. 2: пер. с англ. / ред. Ю. Мураками. – М.: Мир, 1990. – 1016 с.

УДК 623.454

В. В. Козлов, доктор технических наук, профессор, Черноморское высшее военное морское училище имени П. С. Нахимова, Севастополь

А. В. Васильев, Черноморское высшее военное морское училище имени П. С. Нахимова, Севастополь

Д. Л. Голубцов, Черноморское высшее военное морское училище имени П. С. Нахимова, Севастополь

ХАРАКТЕР УДАРНО-ВОЛНОВЫХ ПОРАЖАЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ЖИВУЮ СИЛУ В СРЕДСТВАХ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ БРОНЕЗАЩИТЫ

В современных боевых операциях доля потерь личного состава от действий осколков достигает 80%. В настоящее время продолжается непрерывное совершенствование осколочных боеприпасов за счет использования высокоосколочных сталей, в первую очередь кремнистых и высокоуглеродистых, применения готовых поражающих элементов и т. д.

Основываясь на опытных данных, примем распределение осколков артиллерийских снарядов калибра от 82 до 152 мм, представленное в табл. 1.

Как видно, более 75% осколков артиллерийских снарядов имеют массу до 1,0 г, осколки большой массы (более 25 г) встречаются редко [1].

Для правильной оценки повреждения живого организма необходимо знать энергетические уровни